# LA FISICA NELLA SCUOLA

Quaderno 26

# I fondamenti sperimentali e storici dell'elettricità

Andre Koch Torres Assis

Bollettino trimestrale dell'Associazione per l'Insegnamento della Fisica

Anno L n. 2 Supplemento

aprile-giugno 2017

**QUESTO VOLUME**

è stato curato da

*PIETRO CERRETA, RITA SERAFINI, RICCARDO URIGU*

Traduzione dall'originale a cura di PIETRO CERRETA
(docente in pensione, Associazione ScienzaViva, Calitri),
ANDREA CERRETA (Dipartimento di Fisica, Università di Friburgo, Svizzera)
e RAFFAELE CERRETA (Ingegnere delle Telecomunicazioni, Calitri)

## QUOTE DI ASSOCIAZIONE 2017 (anno solare)

| | |
|---|---|
| Socio ordinario ............................. | € 40,00 |
| Socio aggregato (solo studenti) .............. | € 20,00 |
| Socio sostenitore ........................... | € 60,00 |
| Socio collettivo ............................. | € 80,00 |

Socio all'estero: aggiungere € 5,00 per spese postali.

I versamenti devono essere eseguiti sul C.C.P. **12428041** intestato a: ASSOCIAZIONE PER L'INSEGNAMENTO DELLA FISICA. In alternativa, è possibile pagare le quote sociali con la **carta di credito** (tramite PayPal), dalla pagina web: **http://www.aif.it/iscrizione**.

Le quote devono sempre essere versate al netto delle spese. Si prega di indicare con chiarezza - a stampatello sul bollettino: cognome, nome, indirizzo privato, e-mail, precisando se si tratta di RINNOVO (COMPRENSIVO di ABBONAMENTO a LA FISICA NELLA SCUOLA) o NUOVA ISCRIZIONE.

**Ai Soci viene inviata gratuitamente «La Fisica nella Scuola» e, in via sperimentale, i Supplementi.**

La spedizione in abbonamento ha corso dalla data di ricevimento del versamento. Non si spediscono arretrati. Ai soci morosi la spedizione del Bollettino viene sospesa a partire dal n. 2, aprile-giugno di ogni anno.

Per problemi relativi a disfunzioni nell'arrivo della rivista e per cambi di indirizzo rivolgersi a: AIF Segreteria Soci, segreteria@aif.it.

ABBONAMENTI RIVISTE 2017

I Soci AIF possono abbonarsi al *Giornale di Fisica* (trimestrale edito dalla SIF) e ai *Quaderni di Storia della Fisica* alla quota ridotta di € 80,00. Il versamento deve essere fatto sul CCP 19197409 intestato a Il Nuovo Cimento - Società Italiana di Fisica S.I.F. - via Saragozza 12, 40123 Bologna BO, indicando il proprio codice di socio A.I.F. (il codice è stampato sulla fascetta di spedizione de *La Fisica nella Scuola*).

In copertina: L'esperimento di Stephen Gray (1666-1736) con il ragazzo sospeso (1731), così come rappresentato nel libro di Doppelmayr, *Neu-entdeckte Phaenomena von bewunderswürdigen Würkungen der Natur*, Nurenburg, 1774. Un ragazzo viene sospeso mediante corde isolanti. Un tubo di vetro strofinato viene avvicinato alle gambe. Le mani e il viso del ragazzo attraggono dei corpuscoli leggeri.

# Prefazione

La pubblicazione di questo nuovo Quaderno-Supplemento di *La Fisica nella Scuola* scaturisce dalla proposta[1] di Pietro Cerreta di tradurre in italiano il libro di Andre Assis *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*. Si tratta di un testo il cui obiettivo principale, di grande interesse didattico, è quello di presentare agli studenti i concetti fondamentali dell'elettrostatica attraverso semplici esperimenti, facendo mettere loro "le mani in pasta" nella materia, al di là di scarne (im)probabili frequentazioni della stessa, esclusivamente libresche o virtuali e, in verità, non proprio elettrizzanti per loro. La strumentazione utilizzata è altrettanto semplice: vari tipi di *versorium*, di elettroscopi, generatori elettrostatici auto-costruibili con materiali di facile reperimento. Il tutto seguendo il filo rosso di un percorso storico che si sofferma su alcuni momenti topici, su invenzioni e scoperte di scienziati-pionieri, protagonisti dello studio dei fenomeni elettrici.

La traduzione è stata curata da Pietro Cerreta con l'aiuto dei figli Andrea e Raffaele: una bella "impresa a conduzione familiare" di cui siamo molto riconoscenti. Con l'entusiasmo coinvolgente, quasi fanciullesco, che lo contraddistingue, Pietro ha inoltre esibito e fatto conoscere in varie sedi e occasioni alcuni degli esperimenti più significativi riportati nel libro di Assis[2].

Come raccomandato dallo stesso Autore, il file del testo tradotto, in formato pdf, verrà messo a disposizione per il *download* libero, anche per non soci, sul sito dell'AIF (http://www.aif.it/). Ringraziandolo ancora per questa sua disponibilità, ci auguriamo anche noi con Andre Assis che ciò possa favorire la diffusione e la fruizione di questo bel libro (perché non anche libro "di testo"?) come supporto didattico per insegnanti e studenti. Penso inoltre che questi ultimi, se adeguatamente coinvolti, potranno addirittura divertirsi (!), cosa auspicabile in un insegnamento scolastico dal "volto umano". D'altra parte, sono intimamente convinto che, tra gli insegnanti, almeno uno (?) già sia sollecitato all'idea di poter comminare a qualche incredulo allievo una bella "sospensione scolastica" ... elettrica, come nell'esperimento di Stephen Gray mostrato nell'immagine di copertina: "divertimenti fisici", all'alba del secolo dei lumi, che rivivono nel XXI.

*Riccardo Urigu*

## Note

1 P. Cerreta, *Il pendolino, il versorium e l'elettroscopio*, Supplemento al n. 3/2015 LFnS, Atti del LIII Congresso Nazionale AIF, Perugia 2014, p. 53-56.

2 Alcuni video degli esperimenti sono disponibili sul sito
http://www.scienzaviva.it/Esperimenti_elettrostatica_2014.php nella pagina dedicata a: *Il pendolino, il versorium e l'elettroscopio. Esperimenti storici di Elettrostatica eseguiti da Pietro Cerreta con il kit fornito dal prof. André Assis*.
*Rubbing. Electroscopes and Conductors*, video dall'edizione 2017 di *Science on Stage*, Debrecen (Ungheria): http://www.scienzaviva.it/video_15.php

# Indice

# Presentazione e ringraziamenti

Nei primi anni del 1990 scoprii l'opera di Norberto Cardoso Ferreira, dell'Istituto di Fisica dell'Università di São Paulo (USP) in Brasile. Uno dei suoi interessi di ricerca era quello di dimostrare sperimentalmente gli aspetti più importanti dell'elettricità, utilizzando materiali molto semplici e facilmente reperibili. Ebbi l'opportunità di fargli visita nel 1993. Durante questa visita mi diede un piccolo set di materiali sperimentali realizzati con cartoncino, cannucce di plastica, carta velina, graffette, ecc. Mi mostrò come eseguire i principali esperimenti e inoltre mi mostrò il suo libro *Plus et Moins: Les Charges Électriques*[1]. Rimasi affascinato da quello che avevo imparato, rendendomi conto di come fosse possibile immaginare sperimentalmente fenomeni fisici molto profondi avendo a che fare con materiali comunemente usati. Conservai questo materiale come un tesoro per 10 anni, ma non lo usai né lo accrebbi durante questo periodo. Sono estremamente grato a Norberto Ferreira per quello che ho imparato da lui. Recentemente ho scoperto altre opere di Ferreira, come sempre estremamente ricche e creative[2]. Ho appreso altro ancora durante le discussioni con i suoi studenti, come Rui Manoel de Bastos Vieira ed Emerson Izidoro dos Santos.

Nel 2005 incontrai Alberto Gaspar e scoprii il suo libro *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*[3]. Anche dal suo libro e da altri suoi lavori[4] ho assimilato molto.

Tra il 2004 e il 2007 ho tenuto corsi per insegnanti di scienze delle scuole superiori nel progetto *Teia do Saber* della Segreteria dell'Educazione dello Stato di São Paulo, in Brasile. È stato un grande privilegio quello di essere invitato a partecipare a questo progetto. Il sostegno che ho ha ricevuto dalla Segreteria dell'Educazione e dal Gruppo di Coordinamento dei Progetti Educativi dell'Università di Campinas (GGPE-UNICAMP), come pure i ricchi contatti con gli insegnanti di scienze delle scuole superiori che hanno seguito i nostri corsi, sono stati estremamente produttivi e stimolanti per me. Ho anche beneficiato notevolmente dei numerosi scambi di idee con i docenti presso l'Università di Campinas che hanno partecipato a questo progetto. Come parte delle mie attività, decisi di insegnare ai docenti di scienze delle scuole superiori quello che avevo imparato con Norberto Ferreira. Di conseguenza, ritornai a quegli esperimenti con l'ulteriore motivazione di scrivere questo libro, al fine di condividere tutto questo materiale affascinante con un pubblico più ampio.

L'ispirazione per la maggior parte degli esperimenti descritti in questo libro è stata presa dalle opere originali degli scienziati qui discussi e dai libri e gli articoli di Norberto Ferreira e Alberto Gaspar. A partire dal 2004, ho scoperto altre opere stampate e siti web interessanti che sono stati estremamente utili per il mio apprendistato in questo campo, come ad esempio il sito di *Feira de Ciências*, curato da Luiz Ferraz Netto[5].

John L. Heilbron suggerì alcun miglioramenti rilevanti alla prima versione di questo libro. La sua grande opera, *Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study in Early Modern Physics*[6], è stata la nostra principale fonte di informazioni storiche relative all'elettrostatica. Molti suggerimenti importanti per migliorare una versione precedente di questo lavoro sono stati dati anche da Sérgio Luiz Bragatto Boss, John Eichler, Steve Hutcheon, Fabio Miguel de Matos Ravanelli e Bertrand Wolff.

Le figure di questo libro sono state preparate da Daniel Robson Pinto, tramite una borsa di studio assegnata dalla SAE/UNICAMP, che ringraziamo per questo sostegno. Daniel è stato anche d'aiuto nel procurarci antiche figure e riferimenti bibliografici.

Vorrei anche ringraziare molte altre persone per suggerimenti, discussioni e indicazioni: Christine Blondel, Paolo Brenni, João José Caluzi, Juliano Camillo, Hugo Bonette de Carvalho, João Paulo Martins de Castro Chaib, Asit Choudhuri, Roberto Clemen-

te, Junichiro Fukai, Hans Gaab, Robert Harry van Gent, Harald Goldbeck-Löwe, Jürgen Gottschalk, Peter Heering, Elizabeth Ihrig, John Jenkins, Siegfried Kett, Ellen Kuhfeld, Wolfgang Lange, Lin Liu, José Joaquín Lunazzi, Ceno Pietro Magnaghi, Eduardo Meirelles, Mahmoud Melehy, Dennis Nawrath, Marcos Cesar Danhoni Neves, Horst Nowacki, Martin Panusch, José Rafael Boesso Perez, Karin Reich, Edson Eduardo Reinehr, Ricardo Rodrigues, Waldyr Alves Rodrigues Jr., Torsten Rüting, Dirceu Tadeu do Espírito Santo, Wayne M. Saslow, Fernando Lang da Silveira, Moacir Pereira de Souza Filho, Christian Ucke, Alvaro Vannucci, Geraldo Magela Severino Vasconcelos, Greg Volk, Karl-Heinrich Wiederkehr, Bernd Wolfram e Gudrun Wolfschmidt.

Desidero ringraziare gli Istituti di Fisica e Matematica, il Coordinamento del Gruppo di Progetti Educativi, e il Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão (FAEPEX) dell'Università di Campinas (UNICAMP), che ha dato il supporto necessario per intraprendere questo lavoro. Ringrazio anche l'Istituto per la Storia delle Scienze Naturali dell'Università di Amburgo e la Alexander von Humboldt Foundation of Germany per un assegno di ricerca nel 2009 durante il quale abbiamo raccolto un notevole materiale bibliografico per questo libro.

Roy Keys, il Direttore di Apeiron, è stato una persona che mi ha sostenuto per molti anni. Senza il suo incoraggiamento alcuni dei miei libri non avrebbero potuto essere pubblicati. Egli ha svolto un ottimo lavoro editoriale per questo libro.

Andre Koch Torres Assis
Institute of Physics
University of Campinas – UNICAMP
13083-859 Campinas – SP, Brazil
E-mail: assis@ifi.unicamp.br
Homepage: http://www.ifi.unicamp.br/~assis

## Note

1 [FM91]
2 [Fer78], [Fera], [Ferb], [Ferc], [Ferd], [Fer06], [Fer01c], [Fer01d], [Fer01b] e [Fer01a].
3 [Gas03].
4 [Gas91] e [Gas96].
5 [Net].
6 [Hei99].

# Capitolo 1

# Introduzione

Uno degli obiettivi di questo libro è quello di presentare i fenomeni di base dell'elettricità attraverso semplici esperimenti eseguiti con materiali a basso costo. In esso descriviamo esperimenti sull'attrazione e la repulsione; mostriamo come elettrizzare oggetti per strofinio/contatto/induzione; analizziamo le diverse proprietà dei conduttori e degli isolanti, ecc. Inoltre, mostriamo come, nel tempo, i concetti teorici si sono formati e modificati, proprio come accade con le leggi fondamentali che descrivono questi fenomeni.

Illustriamo, inoltre, come fenomeni complessi possano essere compresi e chiariti grazie a precedenti esperimenti elementari. Sono anche presentati alcuni esperimenti giocosi e curiosi. Essi sono concepiti per stimolare la creatività e il pensiero critico. Alcuni di essi cercano anche di mettere in relazione i fenomeni quotidiani con le leggi basilari della fisica.

L'accento è posto principalmente sulle attività sperimentali. Partendo dagli esperimenti, infatti, formuliamo le definizioni, i concetti, i postulati, i principi e le leggi che descrivono i fenomeni. I materiali utilizzati sono molto semplici, facilmente reperibili a casa o nei negozi e tutti poco costosi. Tuttavia con essi si possono eseguire esperimenti precisi e costruire strumenti scientifici molto sensibili. Il lettore quindi non dovrà accedere alle strumentazioni che si trovano in una scuola o in un laboratorio di ricerca, dato che potrà costruire da solo le proprie apparecchiature ed eseguire tutte le misurazioni. Per aiutarlo a raggiungere questo obiettivo, per ogni strumento presentiamo diversi montaggi e descriviamo più modi di effettuare le misurazioni.

Un'altra motivazione importante che avevamo in mente prima di scrivere questo libro era quella di offrire ai docenti e agli studenti gli strumenti principali per raggiungere l'autonomia nel campo scientifico. Per fare questo, citiamo alcuni brani delle opere più importanti degli scienziati che hanno fatto grandi e fondamentali scoperte nel campo dell'elettricità. Mostriamo anche come eseguire gli esperimenti che illustrano queste loro scoperte, utilizzando sempre strumentazione a basso costo. In questo modo speriamo che i lettori s'ingegnino a progredire nella scienza sotto molteplici punti di vista, imparando da soli a costruire strumenti, eseguire misure, formulare concetti e teorie per chiarire o spiegare le loro osservazioni, ecc.

Se gli esperimenti qui presentati sono eseguiti in classe, ogni studente dovrebbe svolgere le attività costruendo la propria attrezzatura (elettroscopio, *versorium*[1], pendolo elettrico). Gli studenti, poi, dovrebbero poter portarla a casa. Questo modo di fare è molto più appagante rispetto ad esperimenti semplicemente dimostrati dal docente, situazione nella quale gli allievi di solito non mettono le mani "in pasta". E questo perché riteniamo che la scienza di tipo *hands-on* sia una delle tecniche di apprendimento più efficaci.

Oltre alla parte sperimentale, questo libro è anche ricco di informazioni storiche, che forniscono il contesto in cui alcuni fenomeni e leggi sono venuti alla luce. Esso ne dà anche diverse interpretazioni. Particolare cura viene posta inoltre nella formulazione e nella definizione dei concetti e dei principi fisici trattati. Cerchiamo di porre attenzione alle parole usate, facendo ogni sforzo per distinguere con chiarezza tra definizioni, postulati e risultati sperimentali. Facciamo anche una netta distinzione tra la descrizione e la spiegazione di un fenomeno. Lo scopo è quello di illustrare gli elementi umani e sociologici incorporati nella formulazione delle leggi fisiche. Non seguiamo la successio-

ne cronologica delle scoperte. Però, ove possibile, descriviamo il contesto in cui è stato scoperto ogni fenomeno e citiamo anche i maggiori scienziati coinvolti. Le principali informazioni storiche qui presentate sono state desunte dalle opere originali citate nel testo e anche dagli eccellenti libri di Heilbron[2]. Il nostro obiettivo, però, non è quello di presentare le diverse spiegazioni e i modelli teorici che sono stati proposti attraverso i secoli per spiegare i fenomeni elettrici. I libri di Heilbron sono alcune delle migliori fonti per chiunque sia interessato a questi ultimi aspetti.

Al fine di mantenere questo libro entro una dimensione ragionevole, abbiamo scelto pochi argomenti specifici da discutere più dettagliatamente. In un libro futuro speriamo di affrontare altri aspetti importanti relativi all'elettricità seguendo una procedura simile. Ci occuperemo allora di scintille e scariche, del potere delle punte, del vento elettrico, dell'elettroforo di Volta, della bottiglia di Leida, della gabbia di Faraday, di Gray e della conservazione delle cariche elettriche della longevità dell'elettrizzazione di oggetti o di come immagazzinare l'elettricità per un lungo periodo, della legge di Ohm, dell'elettrizzazione per contatto/rotazione/separazione, dei generatori di carica, degli elettreti, della capacità e della distribuzione di carica tra conduttori, dell'elettricità atmosferica, delle figure di Lichtenberg, ecc.

Nel presente libro si dimostra che molte questioni fondamentali della scienza, pur avendo una grande importanza storica o concettuale, possono essere esplorate mediante esperimenti eseguiti con materiali molto semplici. Lungo tutto il testo mostriamo che alcuni grandi scienziati del passato affrontarono fenomeni che oggi ci sembrano così semplici e banali, ma che in realtà ancora celano misteri molto profondi.

Questo libro è stato scritto per gli insegnanti e gli studenti di fisica, matematica, scienza e ingegneria. Non è un libro di esperimenti per i bambini. Può essere utilizzato in scuole superiori o università, a seconda del livello in cui ciascun fenomeno o legge viene analizzato. Vi si trova del materiale sperimentale e teorico che può essere utilizzato a tutti i gradi dell'insegnamento. Ogni insegnante può scegliere il materiale qui presentato e adattarlo al suo ambiente scolastico. Può anche essere utilizzato nei corsi di storia e di filosofia della scienza. Di parti di questo lavoro ci si può avvalere ad un livello post-laurea o per ulteriori ricerche scientifiche.

Il modo migliore per sfruttare questo libro è quello di realizzare la maggior parte degli esperimenti qui descritti mentre lo si legge, più che leggerne solo i contenuti. L'approccio preferibile sarebbe quello di provare a ripetere, perfezionare, e modificare ciò che viene proposto. Anche se la fisica si presenta sotto aspetti diversi – filosofici, teorici, e matematici – essa è essenzialmente una scienza sperimentale. È la convivenza in essa di tali diversità che la rende così affascinante. Ci auguriamo che il lettore, nell'eseguire gli esperimenti, provi un piacere pari a quello che abbiamo provato noi nel progettarli.

Mi piacerebbe ricevere le opinioni dei lettori che hanno cercato di riprodurli e svilupparli, o tentato di applicarli nelle loro scuole e università. Anch'io avrei gradito imparare la fisica in questo modo. Intendo dire che invece di imparare diverse formule a memoria e passare la maggior parte del mio tempo a risolvere esercizi di matematica, personalmente preferei imparare la fisica nel modo qui illustrato, avendo la possibilità di costruire strumenti e di eseguire esperimenti, apprendendo in maniera pratica come i fenomeni importanti sono stati scoperti e interpretati per la prima volta e riproducendo da me la maggior parte di questi effetti con materiali semplici. Sarebbe anche molto interessante esplorare diversi modelli e concetti teorici per spiegare i fenomeni osservati. Questo libro è il nostro contributo per migliorare l'educazione della fisica, in un modo simile a quello che è stato fatto con il concetto del centro di gravità e la legge della leva[3]. Speriamo che la scienza possa così essere presentata in modo più tangibile, ricco di contesto storico, mediante il quale la creatività e lo spirito critico degli studenti ne risulti stimolato.

Sarei felice se questo libro fosse tradotto in altre lingue. Sarebbe meraviglioso se gli insegnanti di fisica potessero indicare questo materiale ai loro colleghi e studenti. Spero anche che possa motivare altri a provare a fare qualcosa di simile in altri campi della scienza, utilizzando ugualmente sia esperimenti eseguiti con materiali accessibili che informazioni storiche relative al soggetto.

Richiamiamo l'attenzione del lettore su alcuni punti importanti, prima di iniziare questi esperimenti. Normalmente essi funzionano bene nei giorni freddi e secchi. Nei giorni umidi, caldi, o quando piove, molti degli effetti qui descritti potrebbero non essere visibili, o i fenomeni potrebbero essere di bassa intensità, il che rende difficile osservarli. In diverse occasioni, nel libro citiamo i nomi generici di materiali come plastica, vetro, legno, o gomma. Va ricordato però che in realtà vi sono molte varietà di plastica, vetro, legno, gomma, o di qualsiasi altro materiale. Esse sono sostanzialmente diverse l'una dall'altra a causa della loro composizione, del processo di fabbricazione, dell'età, ecc. Pertanto, quando un determinato effetto non è osservato con un certo materiale (con un tipo specifico di plastica per esempio), si dovrebbe provare lo stesso esperimento con uno analogo per vedere cosa succede.

Viene pubblicata una versione portoghese di questo libro dal titolo *Os Fundamentos Experimentais e Historicos da Eletricidade*.

Le espressioni tra parentesi quadre in alcune citazioni sono nostre, destinate a chiarire il significato di alcune frasi.

## Note

1 Vedi il Capitolo 3
2 [Hei79], [Hei82] e [Hei99]
3 [Ass08] e [Ass10c]

# Capitolo 2

# Elettrizzazione per strofinio

### 2.1 Gli inizi dello studio dell'elettricità

**Esperimento 2.1**

Nel primo esperimento tagliamo dei pezzettini di carta e li mettiamo su un tavolo. Prendiamo una cannuccia di plastica e la avviciniamo ad essi, facendo attenzione a non toccarli. Non si produce alcun effetto sui pezzi di carta (Figura 2.1).

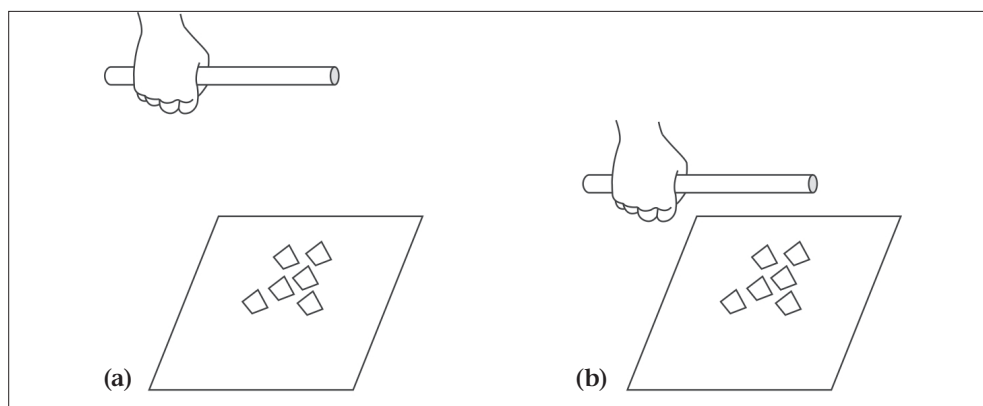



Figura 2.1. **(a)** Cannuccia di plastica lontana dai pezzi di carta. **(b)** Quando la cannuccia di plastica viene spostata in prossimità dei pezzi di carta, nulla accade a loro.

Ora strofiniamo la cannuccia sui nostri capelli o su di un foglio di carta, muovendola energicamente su e giù. Rappresentiamo la regione della cannuccia che è stata strofinata con la lettera F, dalla parola *friction* (strofinio in inglese) (Figura 2.2).

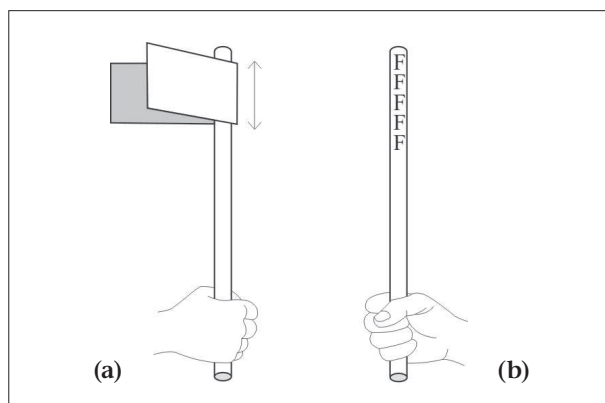



Figura 2.2. **(a)** Cannuccia di plastica strofinata con carta. **(b)** La lettera F rappresenta la regione strofinata della cannuccia.

Successivamente portiamo la cannuccia strofinata in prossimità dei pezzettini di carta, di nuovo senza toccarli, solo avvicinandola molto. Osserviamo che, a una certa distanza, essi saltano sulla cannuccia strofinata e vi rimangono attaccati (Figura 2.3). Anche se muoviamo la cannuccia lontano dal tavolo, i pezzi di carta rimangono attaccati ad essa.

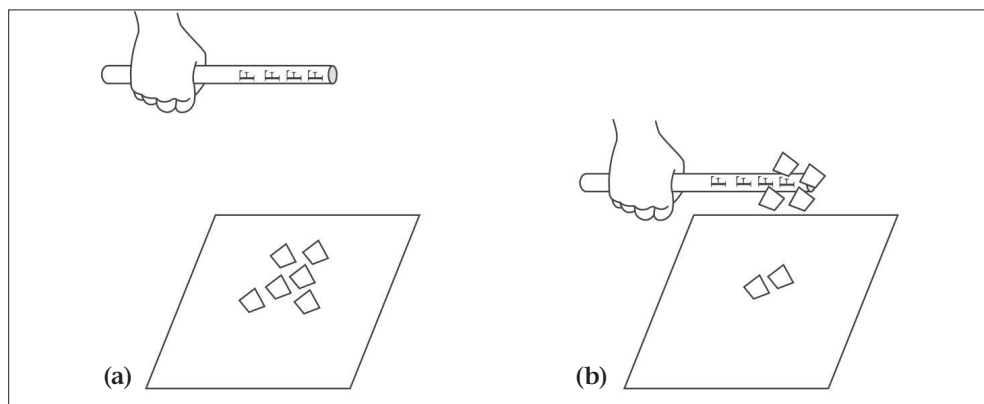



Figura 2.3. **(a)** Una cannuccia strofinata posta a distanza da piccoli pezzi di carta. **(b)** La cannuccia, una volta strofinata, attrae i pezzi di carta quando la si avvicina ad essi.

Non tutti i pezzi di carta rimangono attaccati alla cannuccia strofinata. Alcuni di essi toccano la cannuccia e cadono. Altri sono respinti indietro sul tavolo. Questi fenomeni saranno discussi nelle Sezioni 4.4 e 4.8. Un simile esperimento può essere fatto con la parte in plastica di una penna, un righello di plastica, o un pettine di plastica. Per evitare fenomeni complessi o risultati inaspettati, questi oggetti devono essere fatti di sola plastica, senza parti metalliche, ecc. Nulla accade ai pezzettini di carta quando muoviamo questi oggetti vicino a loro, se questi corpi non sono stati precedentemente strofinati. Strofiniamo ora uno qualsiasi di questi corpi sui capelli o su un foglio di carta. Accostiamo poi la plastica strofinata ai pezzi di carta, senza toccarli. Sono di nuovo attratti dalla plastica, e rimangono attaccati ad essa. Chiunque dovrebbe essere in grado di reperire un materiale plastico appropriato che, quando strofinato, attira facilmente pezzettini di carta. Normalmente citeremo le cannucce, ma possiamo anche utilizzare righelli o pettini, a seconda di ciò che è disponibile o che crea un effetto maggiore.

**Definizioni**: Solitamente diciamo che la plastica che non è stata strofinata e che non attrae piccoli pezzi di carta è *elettricamente neutra* o, semplicemente, *neutra*. Quando è stata strofinata, diciamo che la plastica ha *acquisito una carica elettrica*, diventa *elettrizzata*, *elettricamente carica* o, semplicemente, *carica*. Il processo è chiamato *generazione di carica per strofinio*, *generazione di carica per sfregamento*, *elettrizzazione per frizione*, *triboelettrizzazione*, *elettrizzazione per sfregamento*, o *elettrizzazione per attrito*. Questa attrazione è talvolta indicata come *attrazione elettrica* o come *attrazione elettrostatica*.

In questo e in altri esperimenti si farà riferimento a uno sfregamento tra un oggetto in plastica e i capelli (o tra la plastica e un foglio di carta, o tra la plastica e un tessuto). Per una migliore riuscita degli esperimenti, è buona pratica circondare l'oggetto in plastica con un secondo foglio di carta e tenerlo saldamente nelle mani. Si fanno poi scorrere il corpo e la carta rapidamente in direzioni opposte tenendoli premuti l'uno contro l'altro. Solitamente è meglio compiere questo movimento in una sola direzione,

invece di farlo avanti e indietro. Possiamo ad esempio spostare la plastica verso di noi e la carta lontano da noi. È inoltre conveniente ripetere questa procedura più di una volta prima di iniziare un qualsiasi esperimento, in quanto questo accentua gli effetti da osservare. Di volta in volta conviene sostituire i materiali per osservare come l'effetto varia con materiali differenti. La pratica suggerirà i materiali e le procedure per far riuscire l'esperimento.

## 2.2 L'effetto ambra

La maggior parte di noi, da bambino o da adolescente, ha eseguito un esperimento come questo. E fu con un esperimento analogo che nacque tutta la scienza dell'elettricità! Almeno dai tempi di Platone (428-348 a.C. circa), si sapeva che l'ambra strofinata attira oggetti leggeri posizionati vicini ad essa. La menzione più antica di questo fenomeno, definito a volte "effetto ambra," compare nel suo dialogo, il *Timeo*[1]:

> Consideriamo ancora una volta il fenomeno della respirazione e indaghiamo sulle cause che la rendono così come è. Eccole: poiché non vi è alcun vuoto in cui possa entrare qualsiasi cosa che si muove e poiché il fiato è trasportato da noi nell'aria esterna, quello che segue, come sarà ormai chiaro a chiunque, è che esso non va nel vuoto, ma caccia l'aria vicina dalla sua sede. E l'aria cacciata spinge sempre via quella vicina e secondo questa necessità il tutto viene spinto in giro verso quella sede donde è uscito il fiato, ed entrandovi e riempiendola segue il fiato, e tutto ciò avviene simultaneamente, come una ruota che gira, poiché appunto il vuoto non esiste. [...] Inoltre, come per il flusso di acqua, la caduta del fulmine e le meraviglie che si osservano sull'attrazione di ambra e delle pietre di Eraclea, in nessuno di questi vi è alcuna attrazione; ma chi indaga correttamente troverà che tali fenomeni meravigliosi sono attribuibili alla combinazione di determinate condizioni: la non esistenza di un vuoto, il fatto che gli oggetti spingono gli altri a rotazione, e che cambiano posto, passando separatamente nelle loro proprie posizioni mentre si dividono o si combinano. Tale è, come abbiamo visto, la natura e tali sono le cause della respirazione – donde questa discussione ha avuto origine.

Egli non menziona chi lo abbia scoperto, tuttavia dalla sua occasionale descrizione sembra che l'effetto ambra fosse noto ai suoi lettori. Egli collega l'effetto ambra con quello della pietra di Eraclea o magnete naturale. Platone rifiuta l'idea che esista una vera attrazione tra l'ambra strofinata e gli oggetti leggeri vicini. Tutti questi fenomeni sono spiegati attraverso gli stessi principi validi per la respirazione, cioè con la non esistenza di un vuoto.

L'ambra è una resina traslucida dura di colore dal giallastro al marroncino[2], a volte usata in gioielleria. Dal XIX secolo è noto che essa è la resina fossile di alberi di pino, che sono morti probabilmente molti milioni di anni fa[3]. Alcuni negozi vendono ambra con insetti fossilizzati dentro, come formiche, pulci, o ragni.

In Figura 2.4 vediamo due pezzi di ambra.

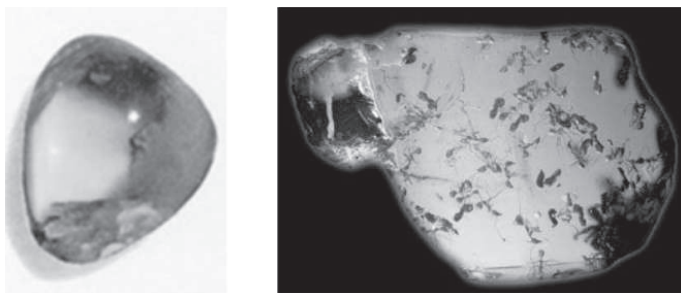



Figura 2.4. Pezzi di ambra.

Aristotele (384-322 a.C.), nella sua opera *Meteorologia*, dimostrò che l'ambra si presentava originariamente in forma liquida e successivamente si solidificava[4]:

> Dei corpi solidi, quelli che vengono solidificati dal freddo sono fatti d'acqua, per esempio ghiaccio, neve, grandine, brina. [...] Di questi corpi, quelli da cui tutta l'umidità è persa sono quelli di terra, come la ceramica o ambra. (Perché anche l'ambra e quei corpi chiamati 'lacrime' si producono dalla refrigerazione, come la mirra, il franchincenso, la gomma. L'ambra, inoltre, sembra appartenga a questa classe di cose: gli animali racchiusi in essa mostrano che è formata per solidificazione. Il calore è spinto fuori dal freddo del fiume e induce l'umidità ad evaporare con esso, come nel caso del miele quando è stato riscaldato ed è immerso in acqua).

Secondo alcuni autori moderni, l'esperimento con l'ambra è stato eseguito per la prima volta da Talete di Mileto, che visse all'incirca dal 625 al 546 a.C.. Platone lo nomina per la prima volta nella sua lista dei sette saggi dell'antica Grecia nel suo dialogo *Protagora*[5]. Ma non attribuisce l'effetto ambra a lui. Talete è considerato da Aristotele e da molti scrittori antichi come il primo filosofo naturale o il primo fisico. Nel suo libro *Metafisica* (A 3, 983 b 6), Aristotele ha scritto quanto segue su di lui (sottolineiamo in particolare la parte in corsivo)[6]:

> La maggior parte di coloro che per primi filosofarono pensarono che principi di tutte le cose fossero solo quelli materiali. Infatti essi affermano che ciò di cui tutti gli esseri sono costituiti e ciò da cui derivano originariamente e in cui si risolvono da ultimo, è elemento ed è principio degli esseri, in quanto è una realtà che permane identica pur nel trasmutarsi delle sue affezioni. E, per questa ragione, essi credono che nulla si generi e che nulla si distrugga, dal momento che una tale realtà si conserva sempre. E come non diciamo che Socrate si genera in senso assoluto, quando diviene bello o musico, e non diciamo che perisce quando perde questi modi di essere, per il fatto che il sostrato – ossia Socrate stesso – continua ad esistere, così dobbiamo dire che non si corrompe, in senso assoluto, nessuna delle altre cose: infatti, deve esserci qualche realtà naturale (o una sola o più di una) dalla quale derivano tutte le altre cose, mentre essa continua ad esistere immutata.
> Tuttavia, questi filosofi non sono tutti d'accordo circa il numero e la specie di un tale principio. *Talete, iniziatore di questo tipo di filosofia*, dice che tale principio è l'acqua (per questo afferma anche che la terra galleggia sull'acqua), desumendo indubbiamente questa sua convinzione dalla costatazione che il nutrimento di tutte le cose è l'umido, e che perfino il caldo si genera dall'umido e vive nell'umido. Ora, ciò da cui tutte le cose si generano è, appunto, il principio di tutto. Egli desunse dunque questa convinzione da questo e inoltre dal fatto che i semi di tutte le cose hanno una natura umida e l'acqua è il principio della natura delle cose umide.

Tuttavia, nessuna delle opere di Talete è giunta fino a noi. L'origine di tutte le affermazioni moderne che collegano Talete all'esperimento dell'ambra è negli scritti di Diogene Laerzio, vissuto intorno al terzo secolo d.C. e che fu un biografo di filosofi greci. La sua opera più importante è chiamata *Vite dei filosofi eminenti*, in 10 volumi. Egli ha detto quanto segue circa Talete[7]:

> […] Egli fu il primo a dare all'ultimo giorno del mese il nome di Trentesimo, e il primo, secondo alcuni, a discutere problemi fisici.
> Aristotele e Ippia affermano che, arguendolo dal magnete e dall'ambra, egli abbia attribuito un'anima o la vita anche ad oggetti inanimati.

Un'altra traduzione di questo brano è la seguente[8]: "Aristotele ed Ippia dicono che, a giudicare dal comportamento della calamita e dell'ambra, egli abbia attribuito anime anche a cose senza vita".

Normalmente un'anima è attribuita a qualcosa che è vivo o che può muoversi con la propria volontà. A volte un'anima è attribuita anche a qualcosa che può crescere, come un uomo, una pianta o un animale. Tali sono i corpi vivi o animati. I corpi inanimati, o corpi senza anima, sono quelli che non sono dotati di vita. Sebbene i magneti e l'ambra né crescono né si muovono da soli, essi hanno la proprietà di generare il movimento di oggetti vicini (come un magnete che attrae il ferro o è attratto dal ferro o l'ambra che strofinata attrae la paglia). Talete potrebbe avere attribuito un'anima al magnete o all'ambra a causa di queste proprietà.

Nonostante queste dichiarazioni di Diogene Laerzio, non è certo se Talete sia stato davvero il primo ad eseguire l'esperimento dell'ambra [9]. Egli è considerato dagli autori successivi l'iniziatore di tante cose in fisica e in matematica, il che lascia qualche dubbio sulla realtà di tutti questi risultati. Per quanto riguarda l'affermazione precedente, è difficile verificare le fonti di Laerzio. Scritti di Ippia non ci sono pervenuti. Come in Aristotele, nelle cui opere giunte fino a noi non si trova l'attribuzione dell'effetto ambra a Talete. Nel suo lavoro *Sull'anima*, Aristotele riportò che Talete attribuì un'anima solo al magnete, siccome può spostare il ferro, ma non fa menzione esplicitamente dell'effetto ambra[10]:

> Talete, anche, a giudicare da ciò che si dice su di lui, sembra che abbia ritenuto l'anima essere una forza motrice, in quanto egli ha detto che il magnete ha un'anima dentro di sé perché fa muovere il ferro.

Gli scavi archeologici hanno dimostrato che l'ambra era conosciuta molti secoli prima di Platone e anche di Talete[11]. Essa era utilizzata in gioielli e ornamenti. È molto probabile che le tante persone che hanno lavorato con l'ambra, commerciandola o semplicemente manipolandola, avessero osservato le sue proprietà attrattive, presumibilmente molti secoli prima di Talete, sebbene non vi sia alcuna traccia scritta a sostegno di questa ipotesi.

In ogni caso, è noto con certezza che almeno dai tempi di Platone, nel IV secolo a.C., l'effetto ambra era conosciuto nell'antica Grecia. In antichità, l'ambra probabilmente veniva strofinata con capelli, con tessuti o con la pelle di una persona o di un animale. Ed era stato osservato che essa attirava corpi leggeri come piume, paglia o capelli umani.

## 2.3 Esplorare l'attrazione esercitata dai corpi strofinati

Per avere un buon livello di neutralità elettrica per i prossimi esperimenti, è meglio utilizzare almeno due cannucce (o due righelli in plastica). Una di loro non dovrà mai essere strofinata. Questa sarà la nostra cannuccia neutra. L'altra cannuccia è quella che sarà strofinata una o più volte durante gli esperimenti. Anche quando questa seconda cannuccia avesse apparentemente perso la sua carica elettrica tra due esperimenti, non dovrebbe mai essere utilizzata come cannuccia neutra in quanto alcune cariche elettriche residue potrebbero essere rimaste su di essa. A volte il solo maneggiare un pezzo di cannuccia o rimuovere la polvere che si è accumulata sulla sua superficie può caricarla. Pertanto il criterio per poter considerare una cannuccia neutra deve tener conto del fatto che essa non attiri oggetti leggeri vicini.

**Esperimento 2.2**

Ora ripetiamo l'Esperimento 2.1 strofinando la cannuccia di plastica con altri materiali come ad esempio un foglio di carta, la pelle, un panno o un sacchetto di plastica. Portando la cannuccia strofinata vicino a pezzettini di carta o di paglia, vediamo che essi ne sono attratti come nell'Esperimento 2.1, quando essa è stata strofinata sui capelli, anche se con intensità non sempre identica. Una cannuccia di plastica diventa altamente elettrizzata se strofinata sui capelli, con carta o con un tessuto di cotone. Non diventa sempre altrettanto elettrizzata se strofinata con un sacchetto di plastica.

## 2.4 Quali corpi sono attratti dalla plastica strofinata?

### Esperimento 2.3

In questa sezione vogliamo rispondere alla seguente domanda: quali corpi sono attratti dalla plastica strofinata? Domande come queste o come “esiste la repulsione?”, “esistono l’azione e la reazione?”, “quanti tipi di carica sono osservati in natura?” e simili, è ovvio, sono basate su conoscenze recenti. Di norma i primi investigatori non si sono posti queste domande o, perlomeno, non in tale forma. Domande del genere sono più il risultato del loro lavoro che la sua ragione. In ogni caso, in questo libro ci poniamo tali domande al fine di attirare l’attenzione sulle principali proprietà delle azioni elettriche.

Analizziamo ora quali materiali sono attratti dalla plastica strofinata o da un pezzo di ambra strofinato. Lo sfregamento può essere fatto con carta, capelli, o un panno di cotone. Per il nostro esperimento, poniamo svariati gruppi di materiali leggeri in parti diverse di un tavolo. Essi possono essere stati suddivisi in piccoli pezzi, in corti fili o polverizzati. Ad esempio frammenti di paglia, fili di cotone sottili, parti di un sacchetto di plastica, ritagli di un foglio di alluminio (come quello utilizzato in cucina o nei pacchetti di sigarette), polvere di gesso, farina, limatura di ferro, lana d’acciaio, piccole palline di polistirolo, piume, capelli, segatura, zucchero, sale, piccoli pezzi di sughero, ecc.

Ci teniamo a sottolineare un punto importante prima di eseguire questi esperimenti. L’oggetto strofinato non deve toccare i pezzettini disposti sul tavolo; dovrebbe essere solo avvicinato ad essi. Se il corpo strofinato li tocca, essi possono attaccarvisi a causa dell’umidità o di altri materiali appiccicosi presenti sulla superficie dell’oggetto strofinato o su quella dei pezzettini e non a motivo di un’attrazione elettrostatica agente tra loro.

Quando avviciniamo una plastica neutra a queste sostanze non succede nulla. Dopo aver strofinato la plastica (o l’ambra) e averla portata vicino a questi materiali, senza toccarli, ciò che normalmente si osserva è che quasi tutti sono attratti dalla plastica strofinata. Vale a dire che si muovono verso la plastica strofinata, saltando su di essa. Solo i piccoli pezzi di plastica non ne sono attratti, o sono attratti molto poco rispetto agli altri materiali.

### Esperimento 2.4

Un esperimento analogo può essere fatto con cavi o fili di seta, cotone, poliestere[12], nylon (poliammide sintetico), capelli, e rame. Spolette di basso costo di seta, cotone, poliestere, poliammide possono essere trovati nei negozi di cucito. Il filo di seta, in particolare, sarà impiegato in molti esperimenti ed è quindi una buona idea acquistarne un rocchetto. Riguardo al rame, è possibile estrarlo aprendo un cavo intrecciato che si vende in un negozio di materiale elettrico. Esso contiene più fili sottili di rame fianco a fianco. In questo esperimento utilizziamo solo uno di questi sottili fili di rame, tagliato in piccoli pezzi a che noi chiameremo semplicemente fili.

Tagliamo diversi pezzi di questi fili della stessa lunghezza, per esempio lunghi 1 o 2 cm. Collochiamo in un punto del tavolo pezzi di seta, in un altro pezzi di poliestere, ecc. Passiamo una cannuccia di plastica neutra nei pressi di questi materiali e non accade nulla. Strofiniamo un’altra cannuccia e avviciniamola a ciascuno di questi gruppi di fili, senza toccarli. Osserviamo che i filamenti di cotone e di rame sono fortemente attratti. Gli altri materiali non sono attratti o sono attratti molto meno. In questo caso abbiamo fili della stessa lunghezza ma di diverso peso, a causa delle loro diverse densità e degli spessori. Tuttavia, è facile vedere che quelli di cotone e di rame sono i fili più pesanti a causa della loro elevata densità e talvolta anche del loro maggiore spessore. Nonostante ciò risultano attratti dalla plastica strofinata maggiormente rispetto ai materiali più leggeri.

Per i materiali che hanno all’incirca lo stesso peso, da questi esperimenti notiamo che la maggior parte di essi sono attratti dalla plastica strofinata, anche se alcuni lo sono molto più di altri. Solo pochi non sembrano esserlo o mostrano un’attrazione molto debole.

**Esperimento 2.5**

Un esperimento interessante per mostrare l'attrazione esercitata sui metalli dalla plastica strofinata utilizza lattine vuote di alluminio, di birra o di bibite analcoliche. Una di queste lattine è collocata su una superficie liscia. Una cannuccia di plastica viene strofinata e portata nelle vicinanze della lattina, con la sua parte lunga parallela ad essa, alla stessa altezza del suo asse di simmetria. Quando la cannuccia è molto vicina alla lattina, ma senza toccarla, questa inizia a muoversi verso la cannuccia (Figura 2.5). Possiamo anche far muovere la lattina avanti e indietro cambiando la posizione della cannuccia, ponendola cioè da un lato o dall'altro della lattina.

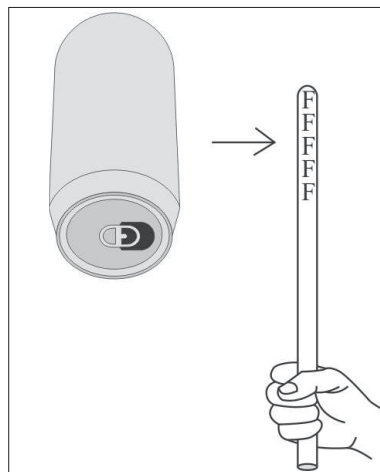



Figura 2.5. Una cannuccia strofinata attrae una lattina metallica.

**Esperimento 2.6**

Muoviamo un magnete naturale, come un magnete da frigorifero o un magnete da altoparlante, nei pressi dei materiali sul tavolo descritti negli Esperimenti 2.3 e 2.4. Osserviamo che il magnete attira solo la limatura di ferro e la lana d'acciaio. Il magnete non influenza tutto il resto, nemmeno i pezzi di filo di rame o del foglio di alluminio.

Questa è una delle principali distinzioni tra forze elettriche e magnetiche. L'ambra e la plastica strofinate attraggono quasi tutti i materiali leggeri. Un magnete permanente, invece, ne attrae solo pochi: in generale solo quelli che contengono ferro.

Le parole magnete, magnetismo, magnetico, ecc. derivano il loro nome da una regione chiamata Magnesia, dove gli antichi greci trovarono la magnetite, un minerale magnetico presente in natura fatto di ossido di ferro, che aveva la proprietà di attrarre piccoli pezzi di ferro.

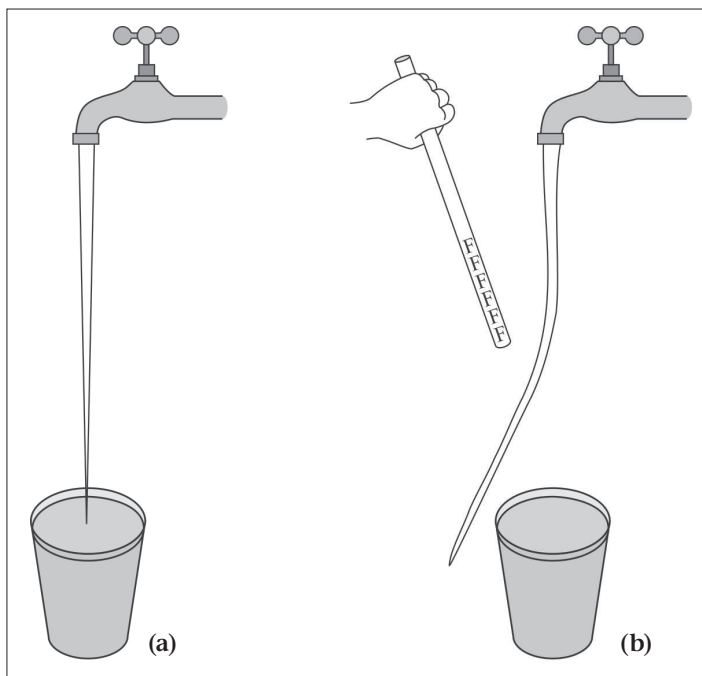
**Esperimento 2.7**

Se cercassimo di attaccare un magnete ad una pentola di alluminio, non avremmo successo. Inoltre non riusciremmo ad attirare con il magnete la lattina di alluminio dell'Esperimento 2.5. Ciò ribadisce la distinzione tra forze elettriche e magnetiche. Questo inoltre conferma che non tutti i metalli sono attratti da un magnete, ma solo alcuni tipi di metalli, normalmente quelli che contengono ferro nella loro composizione.

## 2.5 È possibile attrarre i liquidi?

**Esperimento 2.8**

Nell'Esperimento 2.1 abbiamo operato con oggetti solidi. Consideriamo ora l'effetto della plastica strofinata sui liquidi. Ancora una volta è meglio avvicinare la cannuccia al liquido. La cannuccia può essere neutra o può essere stata strofinata in precedenza. Dobbiamo sempre evitare che la cannuccia tocchi il liquido. Apriamo il rubinetto in modo che un sottile filo d'acqua scorra dolcemente (Figura 2.6 (a)). Portiamo una cannuccia di plastica neutra vicino al flusso e non accade nulla.

Figura 2.6. Una cannuccia strofinata attrae un flusso d'acqua.

Strofiniamo un'altra cannuccia e portiamo ora questa vicino al flusso. Ora il rivolo d'acqua si piega verso la cannuccia strofinata (Figura 2.6 (b)). Lo si vede più facilmente mettendo la cannuccia vicino alla parte superiore del flusso, dove l'acqua ha una velocità inferiore. Talvolta l'attrazione è così intensa che il liquido va a toccare la cannuccia. L'esperimento funziona anche con l'acqua che gocciola. Ancora una volta l'effetto è più visibile se la cannuccia è posta vicino alle gocce più lente.

### Esperimento 2.9

Qualcosa di analogo accade quando si passa una plastica strofinata vicino ad altri liquidi fatti scorrere all'identico modo, come il latte, detergenti vari, l'alcool, il kerosene, lo shampoo o l'olio vegetale da cucina. Per meglio dire, tutti questi flussi sono attratti dalla plastica strofinata, ma non sentono alcuna attrazione da parte di una cannuccia che non era stata strofinata in precedenza. Nel caso dell'olio l'effetto (cioè, la flessione della corrente) non è così forte come nel caso degli altri liquidi. Un esperimento analogo a questi sembra essere stato fatto per la prima volta da Jean Théophile Desaguliers (1683-1744) nel 1741[13]. Alla fine di questo articolo Desaguliers disse quanto segue:

> Avendo opportunamente sospeso (cioè, sospeso attraverso un qualche corpo elettrico, qui con del budello)[14] un contenitore di rame mettendolo con il becco verso il basso, ho aperto il rubinetto e lasciato che il getto d'acqua finisse in un recipiente sottostante. Poi, dopo aver eccitato elettricamente [per strofinio] un grande tubo [di vetro], l'ho tenuto al di sopra di detto contenitore di rame, mentre un assistente reggeva il filo di prova (cioè, un filo appeso ad un bastone) vicino a diverse parti del getto, che lo hanno attirato sensibilmente: allora ho avvicinato al getto il tubo strofinato, che lo ha attirato con forza, curvandolo e talvolta causandone la caduta al di fuori del recipiente sottostante.

Gli studenti godono di questo esperimento divertente e interessante. Sarà discusso più in dettaglio nella sezione 7.11.

**Esperimento 2.10**

Un esperimento analogo può essere fatto con piccole pozze d'acqua piazzate su una superficie asciutta. Quando portiamo una cannuccia neutra vicino alla goccia d'acqua, non accade niente. Invece, quando si mette una plastica strofinata vicino all'acqua, osserviamo che la superficie dell'acqua si deforma, con le parti più vicine alla cannuccia che tendono ad avvicinarsi ad essa (Figura 2.7). A volte la gocciolina d'acqua scorre anche sulla superficie asciutta, muovendosi tutta insieme verso la plastica strofinata. Lo stesso accade con gli altri liquidi citati in precedenza, in misura maggiore o minore.

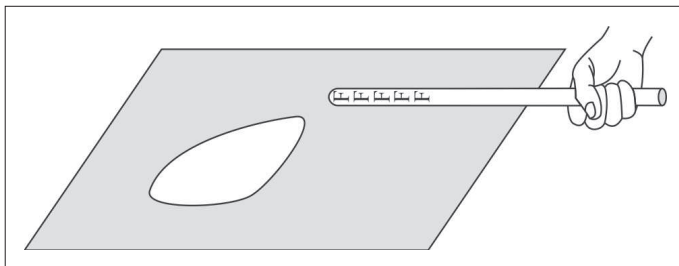



Figura 2.7: Una cannuccia strofinata attrae una goccia d'acqua.

## 2.6 Gilbert e alcuni dei suoi esperimenti elettrici

Uno degli scienziati responsabili della ricerca moderna su magnetismo ed elettricità fu William Gilbert (1544-1603) (Figura 2.8), medico inglese[15].

Nel 1600 egli pubblicò un libro molto importante nella storia della scienza, *Sul magnete e sui corpi magnetici e sulla Terra grande magnete*[16]. In questo lavoro egli descrisse molte importanti scoperte legate al magnetismo. A quel tempo l'orientamento dell'ago magnetico era spiegato attraverso l'allineamento dei poli magnetici dell'ago con i poli della sfera celeste. Gilbert, d'altra parte, propose l'idea che la Terra fosse un enorme magnete e pertanto avesse proprietà magnetiche. Spiegò poi l'orientamento magnetico dell'ago col suo allineamento con i poli magnetici della Terra[17]. Nel secondo capitolo del suo libro, Gilbert descrisse diversi esperimenti elettrostatici che furono eseguiti per distinguere i fenomeni associati ai magneti da quelli associati all'ambra[18]:

Figura 2.8: William Gilbert (1544-1603).

> Bisogna dire alcune parole su questa sostanza [l'ambra], per mostrare la natura dell'adesione di corpi ad essa e per indicare le grandi differenze tra questa e le azioni magnetiche; perché gli uomini ancora perseverano nell'ignoranza e ritengono che la propensione dei corpi verso l'ambra sia un'attrazione paragonabile a quella magnetica.

Chiamò *elettrici* i corpi che avevano la stessa proprietà dell'ambra, il corsivo è nostro[19]:

> I Greci chiamano questa sostanza ηλεκτρον [electron o ambra] perché, quando è riscaldata con lo sfregamento, essa attira a sé la paglia; [...] Questi diversi corpi (*elettrici*) attirano a sé stessi non solo paglia e pula, ma tutti i metalli, il legno, le foglie, le pietre,

> le terre, persino l'acqua e l'olio; in breve, tutte le cose che fanno appello ai nostri sensi o sono solide: eppure ci viene detto [da diversi autori antichi] che essa attrae solo paglia e ramoscelli.

Oppure[20]:

> E la somiglianza non è la causa dell'attrazione dell'ambra, perché tutte le cose che vediamo sul globo, siano esse simili o dissimili, sono attratte da ambra e materiali analoghi; quindi nessuna forte analogia è da trarre sia dalla somiglianza che dall'identità della sostanza.

O anche[21]: "Una calamita attrae solo corpi magnetici; gli elettrici attraggono tutto".

Gilbert sembra essere stato il primo ad osservare un liquido che viene attratto dall'ambra strofinata effettuando un esperimento analogo a quello rappresentato in Figura 2.7[22]:

> Essa [l'ambra strofinata] attira chiaramente il corpo stesso come nel caso di una goccia sferica d'acqua posta su una superficie asciutta; perché un pezzo di ambra tenuto a distanza adeguata attira verso di sé le particelle più vicine e le modella a forma di cono; se fossero attratte dall'aria, tutta la goccia verrebbe verso l'ambra.

Le uniche eccezioni all'attrazione dell'ambra strofinata citata da Gilbert erano oggetti in fiamme o estremamente rarefatti[23], "[...] perché tutti i corpi sono attratti dagli elettrici, tranne i corpi in fiamme o troppo rarefatti, come l'aria che è l'effluvio universale del globo". Egli dimostrò che l'ambra strofinata non attira l'aria nel seguente modo[24]:

> E che l'ambra non attiri l'aria è così dimostrato: si prenda una candela di cera molto sottile che dà una piccola fiamma chiara; si porti un pezzo di ambra o di giaietto largo e piatto[25], accuratamente preparato e strofinato a fondo, ad un paio di dita di distanza da essa; ora un'ambra che attrarrà i corpi da un raggio considerevole non causerà alcun movimento nella fiamma, sebbene tale movimento sarebbe inevitabile se l'aria si stesse muovendo, poiché la fiamma seguirebbe la corrente d'aria.

In seguito egli scrive[26]:

> Gli elettrici attraggono tutte le cose eccetto la fiamma, gli oggetti in fiamme e l'aria più sottile. E poiché non attraggono a sé la fiamma, quindi non hanno effetto su un versorium[27] se esso ha molto vicino, su ogni lato, la fiamma di una lampada o di qualsiasi sostanza che brucia; perché è chiaro che gli effluvi sono consumati dalla fiamma e dal calore igneo. Pertanto gli elettrici non attraggono né la fiamma né i corpi vicini ad essa; pertanto tali effluvi hanno la virtù e l'analogia dell'umore rarefatto e produrranno il loro effetto, portando unione e continuità, non attraverso l'azione esterna degli umori, o tramite il calore, o attraverso l'attenuazione dei corpi riscaldati, ma attraverso l'attenuazione della sostanza umida nei propri specifici effluvi. Eppure traggono a loro stessi il fumo di una candela spenta; e più leggero diventa il fumo ascendendo, meno fortemente è attratto, perché le sostanze che sono troppo rarefatte non subiscono attrazione.

Da quanto visto prima, non tutti i materiali sono influenzati dall'ambra strofinata (o, almeno, non tutti sono attratti con la stessa forza). Anche alcuni materiali aventi stesso peso e forma sono chiaramente attratti da una plastica strofinata con maggior forza di altri. Ad esempio, fili uguali di cotone o di rame sentono un'attrazione più forte di fili di seta o poliammide sintetica.

## 2.7 Quali materiali strofinati attraggono corpi leggeri?

**Esperimento 2.11**

Noi ora cercheremo di attirare piccoli pezzi di carta posti su un tavolo. Avviciniamo diversi oggetti sfregati ai pezzi di carta. Strofineremo questi oggetti nei capelli, in un foglio di carta o in un tessuto di cotone. È importante avere oggetti omogenei, cioè oggetti fatti di un unico materiale, al fine di evitare risultati contraddittori. Non dovremmo, per esempio, strofinare una penna di plastica con parti metalliche. In questo caso è meglio strofinare una cannuccia di plastica ed un cucchiaio di metallo separatamente.

Elenchiamo qui alcune di questi materiali: plastica, ambra, vetro, legno, metallo, acrilico, un magnete naturale, cartoncino sottile, gomma, ecc.

Quando sono state prese le precauzioni menzionate prima, ciò che si osserva di norma è che, dopo lo sfregamento, ambra, acrilico e gli oggetti in plastica attraggono i piccoli pezzi di carta, come nell'Esperimento 2.1 (Figura 2.3).

Tutti gli altri di solito non attirano i pezzi di carta, non importa quanto a lungo o con quanta energia siano strofinati. Questo è rappresentato nella Figura 2.9 per uno spiedino di legno.

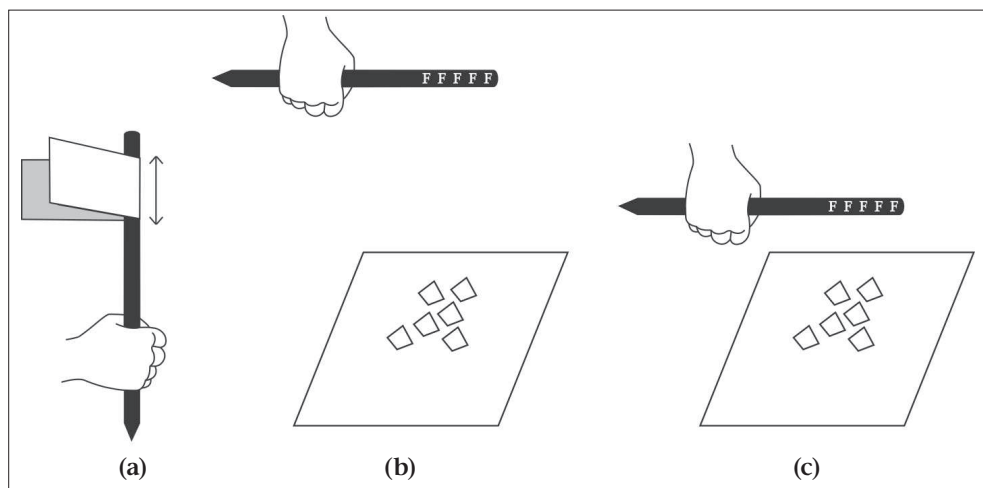



Figura 2.9. **(a)** Un spiedino di legno viene strofinato da un tessuto di cotone o nei capelli. **(b)** Lo spiedino strofinato lontano dai pezzi di carta. **(c)** Osserviamo che esso non attira i piccoli pezzi di carta quando viene portato vicino a loro.

Nel caso del vetro ci sono eccezioni, in quanto vi sono diverse varietà di vetro con differenti composizioni e fatte con molteplici processi di fabbricazione. Ma in generale, dopo essere stati strofinati, i vetri più comuni non attraggono pezzi di carta. Lo stesso si può dire della gomma, anche se vi sono diverse varietà di gomma. I tipi di gomma che di solito troviamo in casa non attirano i pezzi di carta.

## 2.8 Nomenclatura di Gilbert: corpi elettrici e non-elettrici

Fino ai tempi di Gilbert solo di pochi materiali era nota la capacità di attirare piccoli oggetti dopo essere stati strofinati. Tra questi l'ambra, il giaietto[28] e il diamante. È stato durante il Medioevo che si è scoperto che anche il giaietto, una forma compatta e dura di carbone, attrae come l'ambra[29]. Il magnete naturale attraeva il ferro e i suoi composti,

ma non attraeva paglia o pula dopo essere strofinato. Anche gli altri materiali non attraevano oggetti leggeri dopo essere state strofinati. Uno dei principali contributi di Gilbert alla scienza dell'elettricità è stata la scoperta di molti nuovi materiali che si comportavano come l'ambra dopo essere stati strofinati[30]:

> Gli antichi come i moderni dicono (e la loro opinione è dovuta all'esperienza) che l'ambra attrae paglia e pula. Lo stesso succede col giaietto, una pietra estratta dalla terra in Gran Bretagna, in Germania, e in molte altre regioni. Si tratta di una concrezione dura di bitume nero, una sorta di trasformazione da bitume in pietra. [...] Ma non solo ambra e (gagate o) giaietto, come suppongono, attraggono corpuscoli leggeri (sostanze): lo stesso si osserva con il diamante, lo zaffiro, il carbonchio, la pietra iridescente, l'opale, l'ametista, la vicentina, la gemma inglese (pietra di Bristol, *bristola*), il berillo, il cristallo di rocca. Simili poteri di attrazione sono posseduti da vetro, specialmente quello chiaro e brillante; da gemme artificiali fatte di vetro (pasta vitrea) o cristallo di rocca, vetro di antimonio, molte fluoriti e belemniti. Anche lo zolfo attira e allo stesso modo il mastice e la ceralacca [o lacca], la resina dura, l'orpimento (debolmente). Un debole potere di attrazione è anche posseduto in un'atmosfera favorevolmente secca dal salgemma [cloruro di sodio naturale], dalla mica e dall'allume di rocca.

I materiali che, strofinati, non attirano corpi leggeri furono definiti non elettrici. Tra questi Gilbert elencò i metalli, alcuni tipi di legno, il magnete naturale, diverse gemme, ecc. Citiamo dal suo libro[31]:

> All'aria aperta, gli oggetti riscaldati non riescono ad attrarre, nemmeno metalli o pietre portati ad una temperatura molto elevata dal fuoco. Una barra di ferro riscaldato al bianco, una fiamma, una candela, una torcia ardente, o un carbone rovente avvicinati alla paglia o ad un puntatore rotante (versorium) non li attraggono; e tuttavia tutti questi inducono chiaramente l'aria a fluire verso di loro, perché consumano aria come una lampada consuma olio.

Il seguente elenco è molto importante[32]:

> Ma molti corpi elettrici (come le pietre preziose, ecc.) non attraggono affatto a meno che non siano prima strofinati; mentre vari altri corpi, e tra loro alcune gemme, non hanno alcun potere di attrazione, e non possono essere resi attrattivi, neanche per strofinio; tali corpi sono lo smeraldo, l'agata, la corniola, le perle, il diaspro, il calcedonio, l'alabastro, il porfido, il corallo, il marmo, la pietra di Lidia (pietra di paragone, basanite), la selce, l'eliotropio, lo smeriglio o il corindone, l'osso, l'avorio; i legni più duri, come l'ebano; qualche altro legno, come il cedro, il ginepro, il cipresso; i metalli, come l'argento, l'oro, il rame, il ferro. La calamita, anche se può essere molto ben lucidata, non ha l'attrazione elettrica.

Allo stesso modo[33]:

> Il motivo è che né metalli, marmi, selci, legni, erbe, carne, né varie altre sostanze possono attrarre o sollecitare un corpo, sia magneticamente che elettricamente (perché ci piace chiamare forza elettrica quella forza che ha la sua origine negli umori). Ma i corpi costituiti maggiormente di umori e non saldamente compattati dalla natura non sopportano lo strofinio, o cadono a pezzi o diventano morbidi, o sono appiccicosi, come la pece, la colofonia, la canfora, il galbano, la gomma ammoniaca, lo storace, la resina di assafetida, la gomma benjamin, l'asfalto (soprattutto in un ambiente caldo), non attirano corpuscoli. Perché senza attrito pochi corpi liberano la loro vera e naturale *emanazione* o effluvio elettrico. La trementina allo stato liquido non attrae, perché non può essere strofinata; ma quando si indurisce in un mastice essa attrae.

Diverse parole usate fino ad oggi hanno la loro origine nella parola ambra (o *electron* in greco): elettrico, elettronico, elettricità, elettrete, elettronico, elettricista, elettromagnete, elettrodi, ecc. Originariamente la parola *elettricità* significava la proprietà o il potere di attrarre corpi leggeri, come è avvenuto per l'ambra strofinata[34]. Questa parola apparve per la prima volta in un'opera stampata da Sir Thomas Browne (1605-1682) nel 1646. Nel 1820 Ørsted introdusse i termini *elettromagnetismo* e *elettromagnetico*, mentre nel 1822 Ampère introdusse i termini di *elettrostatica* ed *elettrodinamica*[35].

Gilbert definì *elettrici* tutti i corpi che attraevano materiali leggeri dopo essere stati strofinati, sebbene questa nomenclatura non sia più in uso. Le ragioni di questa variazione di terminologia sono riportate nel Capitolo 6, nel Capitolo 8 e nell'Appendice B. Per aiutare a cogliere il senso di molte delle citazioni storiche di questo libro, è importante sapere che oggi questi materiali sono classificati come *isolanti* e *conduttori*. Gli isolanti sono anche detti *non conduttori* o *dielettrici*. I materiali classificati da Gilbert come elettrici sono ora definiti isolanti. E quelli un tempo chiamati non elettrici oggi sono detti conduttori.

## Note

1 [Pla52b, sezioni da 79 a 80, pp. 470-471].
2 Vedere l'Appendice A.
3 [RR53].
4 [Ari52b,p. 492]
5 [Pla52a, pp. 54-55]
6 [Ari52a, Libro 1, Cap. 3, p, 501-502].
7 [Lae91, p. 25].
8 [The56, p. 117].
9 [The56, pp. 117-118] e [RR53].
10 [Ari52c, A 2, Sezione 405, p. 634]
11 [Gui05, p. 59]
12 Vedere Appendice A
13 [Desb, pp. 666-667] e [Pri66, p. 85]
14 Vedere Appendice A
15 [Kel81]
16 [Gil78]
17 [Kel81]
18 [Gil78, p. 27]
19 [Gil78, p. 27].
20 [Gil78, p. 28].
21 [Gil78, p. 30].
22 [Gil78, p. 31].
23 [Gil78, p. 29].
24 [Gil78, p. 31].
25 Vedere appendice A.
26 [Gil78, p. 33 e 34].
27 Vedere il Capitolo 3.
28 Vedere Appendice A
29 [RR57, p. 546]
30 [Gil78, p. 27, le parole di Mottelay tra parentesi quadre]
31 [Gil78, p. 28].
32 [Gil78, p. 29].
33 [Gil78, p. 30].
34 [RR57, p. 558], [Hea67], e [Hei99, p. 169].
35 [Amp 22, pag. 60], [Ørs98a, p. 421], [Ørs98b, p. 426], [Blo82, p. 78], [GG90, p. 920], [GG91, p. 116] e [Cha09, pp. 24-26].

# Capitolo 3

# Il versorium

### 3.1 Il perpendicolo di Fracastoro ed il versorium di Gilbert

Discuteremo ora del più antico strumento elettrico. Esso fu creato da Girolamo Fracastoro (1478-1553) (Figura 3.1). Alcuni si riferiscono a lui come a Fracastoro, altri come a Fracastorio[1]. Era un poeta, medico e filosofo di Verona[2]. Fracastoro è meglio conosciuto per le sue opere di medicina, in particolare sull'epidemiologia. Ha dato il nome di *sifilide* ad una nota malattia venerea.

Il suo strumento fu presentato per la prima volta in un libro pubblicato nel 1546[3]. Egli lo utilizzò per mostrare che l'ambra strofinata non attrae solo paglia o pula, ma anche un altro pezzo di ambra, e persino un metallo come l'argento. Scoprì anche che il diamante strofinato ha la proprietà di attrarre materiali leggeri, come l'ambra. Fracastoro descrive il suo nuovo strumento con le seguenti parole[4]:

> Noi infatti alla presenza di molti dei nostri medici facemmo esperienza di molte cose con un *perpendiculo* bene e convenientemente adattato come è nella bussola da navigare e vedemmo manifestamente che il magnete attrae il magnete, il ferro il ferro, poi che il magnete attrae il ferro e il ferro il magnete; e ancora, l'ambra rapisce pezzettini d'ambra... e parimenti l'ambra non avvicina solamente a sé i fuscelli e le pagliuzze, ma anche l'argento.

Figura 3.1. Girolamo Fracastoro (1478-1553).

Quando Fracastoro scrive *perpendiculo*, è da ritenere che si riferisca ad un filo a piombo[5], cioè a un piccolo oggetto sospeso ad un filo verticale retto da un supporto, come un pendolo. Tale filo è libero di muoversi in qualsiasi direzione attorno al punto a cui è attaccato. Poiché in italiano la parola perpendicolo è proprio il sinonimo di detto oggetto, è naturale supporre che il *perpendiculo* di cui parla Fracastoro fosse analogo ad un filo a piombo.

Dalla descrizione che leggiamo sopra si deduce che Fracastoro attaccò un piccolo pezzo di ambra o di argento all'estremità del filo. Portata dell'ambra sfregata vicino al perpendicolo, egli l'avrebbe visto discostarsi dalla direzione verticale ed avvicinarsi a quest'ultima (Figura 3.2).

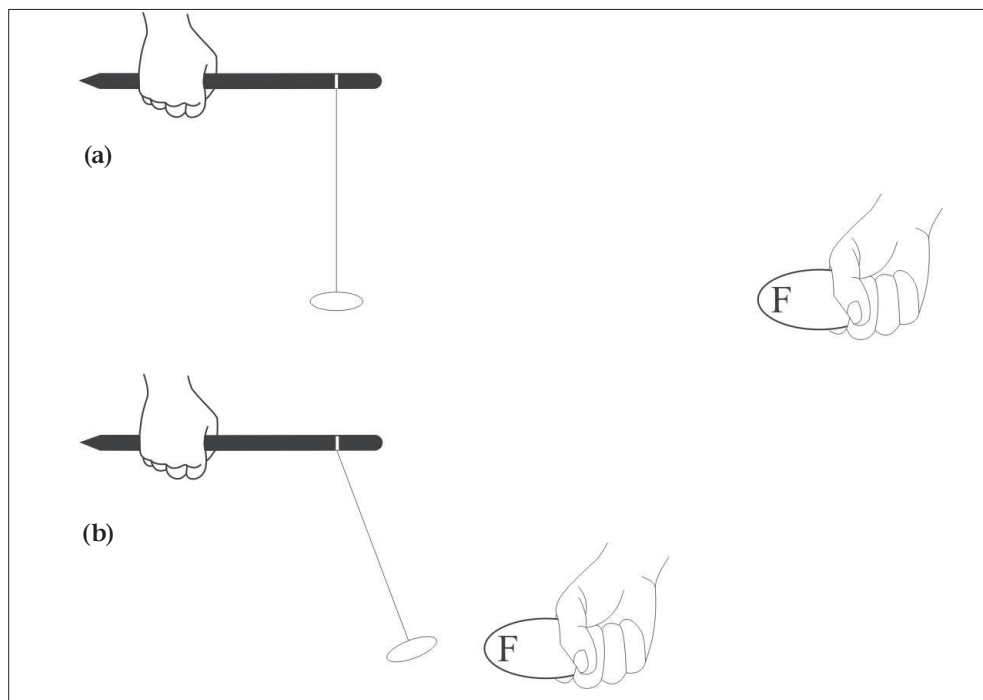



Figura 3.2. Rappresentazione possibile del perpendicolo di Fracastoro e dell'esperimento che egli potrebbe aver fatto con esso. **(a)** La mano tiene un grosso pezzo di ambra. La porzione d'ambra strofinata è rappresentata dalla lettera F. All'estremità inferiore del perpendicolo c'è un altro piccolo pezzo di ambra o di argento che non è stato strofinato. Quando il grosso pezzo di ambra è lontano dal perpendicolo, il filo rimane a riposo in verticale. **(b)** Il perpendicolo è attratto quando l'ambra sfregata F è portata in prossimità del piccolo pezzo di ambra o argento.

Il vantaggio del perpendicolo rispetto alle pagliuzze o alla pula è che la tensione del filo controbilancia il peso del corpo sospeso. È quindi facile vedere il suo movimento in direzione orizzontale anche in presenza di una forza di attrazione molto modesta. D'altra parte, se il piccolo pezzo di ambra o argento fosse collocato su un tavolo, sarebbe più difficile osservare o rilevare qualsiasi movimento, a causa del suo peso. Sarebbe cioè difficile vedere il suo moto verticale verso l'ambra sfregata collocata nelle sue vicinanze.

Gilbert conosceva il libro di Fracastoro e lo citò più volte nel suo libro[6]:

> Fracastorio pensa che tutti i corpi che si attirano reciprocamente sono uguali, o della stessa specie, e questo o nella loro azione o nel loro proprio *subjectum*: "Ora il *subjectum* proprio", egli dice [Fracastoro], "è quello da cui è emesso quel qualcosa di emanativo che attrae, e, in sostanze miste, questo non è percepibile a causa della deformazione, laddove sono una cosa *actu* [in atto], un'altra *potentia* [in potenza]. Quindi, forse, capelli e ramoscelli sono attratti da ambra e diamante non perché essi sono capelli, ma perché è imprigionata al loro interno o dell'aria o qualche altro principio che è per primo attratto e che ha riferimento e analogia con ciò che di per sé stesso attrae; e qui ambra e diamante sono come la stessa cosa, in virtù di un principio comune ad entrambi." Questo secondo Fracastorio.

Gilbert probabilmente cominciò a studiare le proprietà attrattive di altre pietre preziose dopo aver studiato questo libro di Fracastoro. Egli descrisse inoltre uno strumento che chiamò un *versorium*[7], anche se non menzionò che un aggeggio simile, il *perpendi-*

*colo*, fosse stato inventato da Fracastoro. L'immagine originale di Gilbert di questo strumento è mostrata in Figura 3.3.

Figura 3.3. Il versorium di Gilbert.

Il nome *versorium* deriva da una parola latina che ha il significato di *girare* o *ruotare*. Il versorium è uno strumento che è normalmente costituito da due parti: un elemento verticale, che funge da supporto, ed un elemento orizzontale che è in grado di girare liberamente attorno all'asse verticale definito dal supporto.

Sotto questo aspetto, nella sua costruzione esso è molto simile ad una bussola eccetto per il fatto che il componente orizzontale non è magnetizzato come in una bussola. Concettualmente, la possibilità di quest'ultimo di ruotare liberamente significa che esso è molto sensibile a coppie esterne, anche quando sono assai piccole, e quindi che può essere usato per rilevarle nello stesso modo in cui una bussola rileva la coppia magnetica della Terra.

A riposo esso punterà in direzione orizzontale arbitraria (può puntare lungo la direzione Est-Ovest, per esempio, o verso un albero).

## 3.2 Costruire un versorium

Ci sono tre diversi modi per costruire un versorium.

### 3.2.1 Il versorium del primo tipo

Il versorium del primo tipo è come il versorium di Gilbert. Può essere costruito facendo uscire da una base rigida una puntina, uno stuzzicadenti o un chiodo con la punta diretta verso l'alto. La base deve essere pesante o attaccata ad un tavolo per impedire la caduta dell'intero strumento. Il supporto verticale può essere un tappo di sughero con un ago, uno stuzzicadenti posto in verticale nella plastilina o una tavoletta sottile con un chiodo. L'unico requisito è che il sostegno deve rimanere fisso rispetto al suo appoggio, mentre l'elemento orizzontale è libero di ruotare in un piano sopra l'asse verticale formato dal supporto. Il pezzo orizzontale mobile è sostenuto al suo centro dalla punta del perno verticale.

*È importante notare che al fine di evitare la caduta della parte mobile, è essenziale che il suo centro di gravità sia situato al di sotto del punto di contatto tra essa e la punta del supporto verticale*. Una discussione dettagliata del centro di gravità (CG) e le procedure sperimentali per trovarlo possono essere trovate nel libro *Archimede, il Centro di Gravità e la Prima Legge della Meccanica*[8].

Ci sono diversi modi per porre il baricentro della parte mobile al di sotto del suo punto di contatto con il perno. La parte mobile può essere ad esempio a forma di una lettera V capovolta, oppure può avere il suo centro (che sarà in contatto con il perno) piegato verso l'alto in modo tale che quando è posizionato sul perno, la punta di questo si trova sopra il piano della parte mobile (vedi la successiva Figura 3.4). Una parte mobile può essere realizzata semplicemente con una graffetta per carta in ottone o acciaio[9]. In questo caso è meglio creare un piccolo fosso nell'avvallamento centrale della base circolare della graffetta. La punta del perno sarà fatta entrare in questa piccola cavità. Per incavare la graffetta utilizzeremo un chiodo e un martello, ma con cautela, senza perforare il metallo e in modo tale che si formi una piccola indentazione. La parte mobile, grazie a questo espediente, non rischierà di scivolare sul perno e vi si sosterrà bene in equilibrio. Dopo aver piegato le gambe della graffetta verso il basso in modo da ottenere una lettera V rovesciata, questa potrà essere posizionata sul perno.

La parte mobile può anche essere costruita utilizzando una striscia di alluminio (tagliando una lattina di alluminio per bevande), una cannuccia di paglia secca, del legno, del cartone sottile, o un pezzo di plastica (una striscia di plastica dura). La cosa importante è quella di modellare la parte mobile in forma di lettera V rovesciata. La plastica dura può anche essere ripiegata in modo che le due gambe siano rivolte verso il basso. Quando la parte mobile è posizionata sul perno, è importante verificare che abbia piena libertà di ruotare in senso orario e antiorario in orizzontale, senza scivolare o bloccarsi a causa dell'attrito con il perno. A questo punto è pronta per gli esperimenti.

Il versorium del primo tipo è illustrato in Figura 3.4. In (a) abbiamo la base del versorium (in questo caso un perno inserito in un tappo). La parte mobile è mostrata nella Figura 3.4 (b). In questo caso si tratta di una graffetta in acciaio vista dall'alto e di lato, con il centro della sua testa leggermente piegato e le gambe inclinate verso il basso. Il versorium montato e completo, con il centro della graffetta posizionato sulla punta del perno, è mostrato in Figura 3.4 (c).

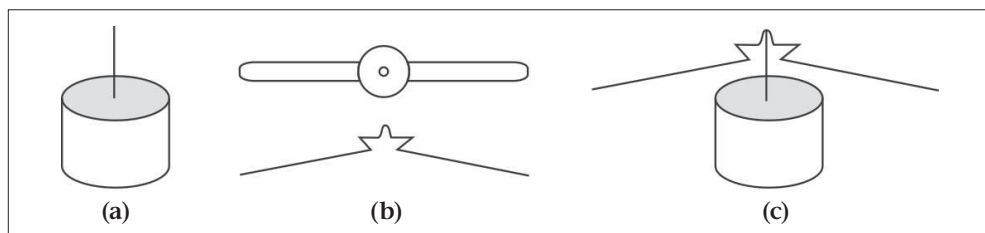



Figura 3.4. Versorium del primo tipo. **(a)** Base del versorium. **(b)** Graffetta d'acciaio vista dall'alto e di lato. (c) Il versorium montato.

### 3.2.2 Il versorium del secondo tipo

Il secondo modo per fare un versorium è attaccare uno spillo a quella che sarà la sua parte mobile. Chiameremo questa parte mobile il "cappello" e può essere una striscia di plastica o di metallo. Lo spillo è ben fissato attraverso il centro del cappello, con la sua punta rivolta verso il basso. Lo spillo ruota insieme al cappello. Questo sistema viene sorretto da una piccola superficie piana orizzontale che è fissa rispetto al suolo, come la testa di un chiodo conficcato in un asse di legno o in un tappo di sughero. In Figura 3.5 vediamo una rappresentazione di questo tipo di versorium: (a) La sua base, in questo caso un chiodo parzialmente inserito in una tavoletta. (b) La parte mobile del versorium, in questo caso una striscia di plastica o di metallo con uno spillo attaccato al suo centro, la cui punta è verso il basso. (c) Il versorium completo, con la punta dello spillo posizionata sulla testa orizzontale del chiodo conficcato nell'asse.

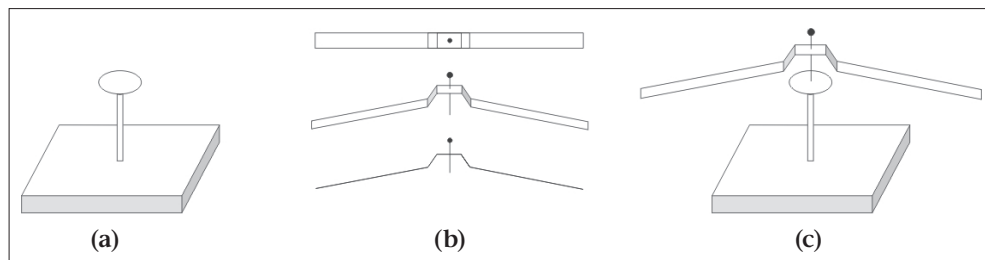



Figura 3.5. Versorium del secondo tipo, con la puntina fissata sulla sua parte mobile. **(a)** Basetta fissa del versorium. **(b)** "Cappello" del versorium (striscia di plastica o di metallo) con la puntina collegata ad esso. **(c)** Versorium montato.

*Per evitare che il versorium slitti, è fondamentale che il centro di gravità del cappello e dello spillo si trovi più in basso rispetto all'estremità appuntita dello spillo.* Il centro di gravità del solo spillo si trova in un punto A tra la testa H e la punta T dello stesso (Figura 3.6 (a)). Normalmente questo punto A sarà più vicino ad H che a T, sebbene qui lo mostriamo vicino al centro della puntina. Il centro di gravità del solo cappello è in un punto B lungo il suo asse verticale di simmetria, tra le sue parti superiore e inferiore (Figura 3.6 (b)).

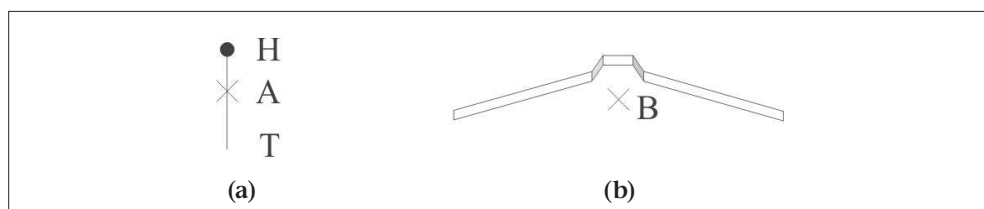



Figure 3.6. **(a)** Il baricentro dello spillo si trova in A. **(b)** Il punto B è il baricentro del cappello.

Il centro di gravità dell'intera parte mobile (cappello e spillo) di questo tipo di versorium si trova in un punto C tra A, centro di gravità della puntina, e B, centro di gravità del cappello. Esistono tre possibilità, come mostrato in Figura 3.7. (a) Se lo spillo ha lo stesso peso del cappello, allora C sarà nel punto medio tra A e B. (b) Se lo spillo è più pesante del cappello, C sarà più vicino ad A. (c) Se lo spillo è più leggero del cappello, C sarà più vicino a B.

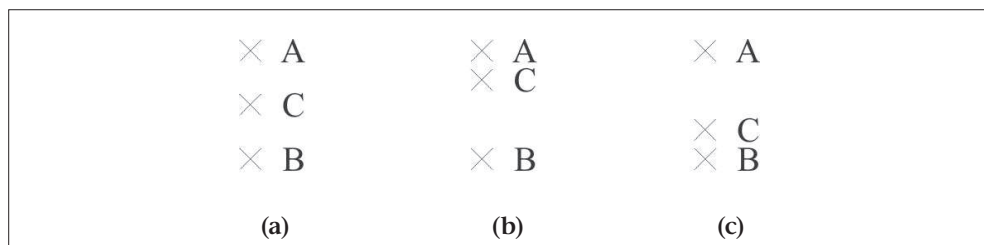



Figura 3.7. Posizione del centro di gravità C della parte mobile del versorium. **(a)** spillo e cappello con lo stesso peso. **(b)** spillo più pesante del cappello. **(c)** spillo più leggero del cappello.

Se C è più in alto rispetto alla punta T della puntina, il versorium slitterà fuori dal chiodo rendendo impossibile bilanciarlo sopra al chiodo. La ragione è che la parte mobile del versorium sarà in equilibrio instabile in questa configurazione. In Figura 3.8 (a) illustriamo questa situazione di equilibrio instabile con il punto C (da Figura 3.7) rappresentato dal simbolo ×. Qui × è verticalmente <u>al di sopra</u> di T, nella sua posizione più alta. Supponiamo che la parte mobile devii leggermente da questa situazione instabile, cioè che la parte mobile si pieghi un poco in un senso orario o antiorario intorno alla punta T del chiodino, in modo che una delle sue gambe si abbassi mentre l'altra si alzi. In questo caso il centro di gravità × della parte mobile si sposterà più in basso rispetto alla sua posizione iniziale. La tendenza del centro di gravità di qualsiasi sistema è di avvicinarsi alla superficie terrestre quando questa possibilità esiste. Pertanto, il versorium continuerà a ruotare in senso orario o senso antiorario, con conseguente caduta della parte mobile.

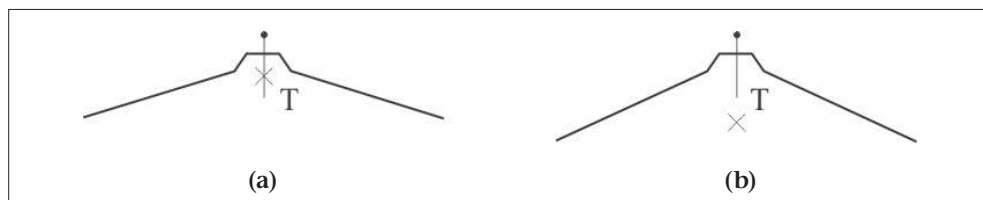



Figura 3.8. Il simbolo × rappresenta il baricentro C della parte mobile del versorium (composta dallo spillo e dal cappello). **(a)** Versorium del secondo tipo in equilibrio instabile, con × al di sopra della punta T dello spillo. **(b)** Versorium in equilibrio stabile, con × al di sotto della punta T.

L'unico modo per bilanciare la parte mobile del versorium sopra il chiodo è avere il punto C sotto la punta T dello spillo. Ciò è mostrato in Figura 3.8 (b), dove il simbolo × indica la posizione del centro di gravità della parte mobile del versorium (costituita dallo spillo e dal cappello). Questa è la configurazione di equilibrio stabile, con × nella sua posizione più bassa, cioè, verticalmente al di sotto della punta T della puntina. In questa configurazione stabile, qualsiasi movimento del versorium in senso orario o antiorario intorno alla punta T della puntina solleverà il baricentro × rispetto alla sua altezza iniziale, quando esso si trova verticalmente sotto la punta T. Il sistema poi tornerà alla configurazione di equilibrio stabile grazie alla coppia di ripristino gravitazionale esercitata su di esso dalla Terra.

A volte è difficile ottenere questa configurazione di equilibrio stabile con una parte mobile così leggera come quella ricavata da una cannuccia di plastica. Per evitare questo problema possiamo infilare una cannuccia dentro un'altra cannuccia, o una striscia di plastica fatta di materiale più denso e più pesante, in modo da controbilanciare il peso della puntina. Un'altra possibilità è quella di tagliare la parte superiore e più pesante dello spillo (compresa la testa) con le pinze, mantenendo solo la parte inferiore (inclusa la punta).

È inoltre possibile piegare le gambe del cappello del versorium verso il basso per abbassare il centro di gravità o semplicemente usare cappelli più lunghi. Un'altra soluzione è quella di sostituire lo spillo con un piccolo chiodo passante per il centro della parte mobile o attaccato al suo centro con colla o plastilina. Quando il sistema è pronto, è importante verificare se esso è libero di ruotare in entrambe le direzioni in orizzontale intorno ad un asse verticale senza slittare. Se slitta lateralmente, è possibile bilanciarlo abbassando una delle gambe, o aumentando la lunghezza di una delle gambe. Siamo quindi pronti per iniziare gli esperimenti.

### 3.2.3 Il versorium del terzo tipo

Il terzo modo di fare un versorium è forse il più semplice. Per la parte mobile scegliamo una striscia fatta di metallo, legno o di un altro materiale appropriato ed attacchiamo un filo di cotone o di seta al suo centro. La striscia deve rimanere orizzontale quando è in quiete e legata per il suo centro. Leghiamo quindi l'estremità superiore del filo ad un supporto che è fisso rispetto al suolo. La parte mobile attaccata all'estremità inferiore del filo è quindi libera di ruotare orizzontalmente in entrambi i sensi attorno al filo verticale.

La Figura 3.9 illustra questo tipo di versorium con la parte mobile retta al centro da un filo verticale attaccato ad una matita. Il *perpendicolo* di Fracastoro era probabilmente un versorium di questo tipo.

Figura 3.9. Versorium del terzo tipo.

Il versorium del terzo tipo ha una proprietà che lo differenzia dagli altri due tipi. La parte mobile dei versorium del primo e del secondo tipo può solo inclinarsi o ruotare intorno ai loro centri che rimangono in quiete relativamente al suolo. Il versorium del terzo tipo, invece, non solo può ruotare attorno ad un asse verticale, ma come un pendolo può anche muoversi complessivamente quando è attratto da un altro corpo. Ciò presenta un vantaggio in termini di versatilità del suo moto. Tuttavia, a volte questo complica l'analisi dei fenomeni che vogliamo descrivere o osservare. Nei seguenti esperimenti inizialmente usiamo solo versorium del primo e del secondo tipo.

Dato un momento torcente esterno costante, è più facile ruotare una parte mobile di un versorium di peso più leggero che una più pesante. Ciò significa che un versorium leggero ha una maggiore sensibilità rispetto ad uno pesante.

Sebbene Gilbert abbia costruito solo versorium in metallo, essi possono essere realizzati in diversi materiali: metallo, plastica, cartone sottile, paglia secca, legno, ecc. Inizialmente lavoreremo solo con versorium in metallo, che chiameremo semplicemente versorium. Quando l'ago girevole è fatto di plastica, carta, o di altro materiale non metallico, chiameremo il sistema versorium di plastica, versorium di carta o usando il nome appropriato. In questo modo saremo in grado di distinguere questi tipi di versorium da quello utilizzato da Gilbert.

## 3.3 Esperimenti con il versorium

### Esperimento 3.1

Portiamo un pezzo di plastica neutra nei pressi di un versorium di metallo, senza farli toccare. Non succede nulla (Figura 3.10).

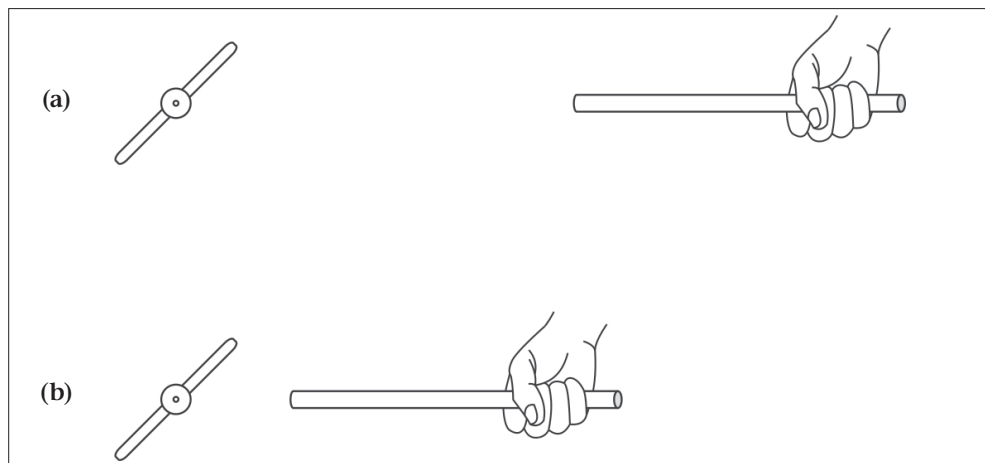



Figura 3.10. **(a)** Un versorium di metallo punta in una direzione arbitraria quando è lontano da un pezzo di plastica neutro. **(b)** Il versorium rimane in quiete quando la plastica neutra è portata vicino ad esso.

Sfreghiamo un altro pezzo di plastica e ripetiamo l'esperimento. In questo caso osserviamo che il versorium di metallo è orientato dalla plastica sfregata, puntando verso di essa (Figura 3.11). Lo stesso accade con un versorium di legno e un versorium di carta.

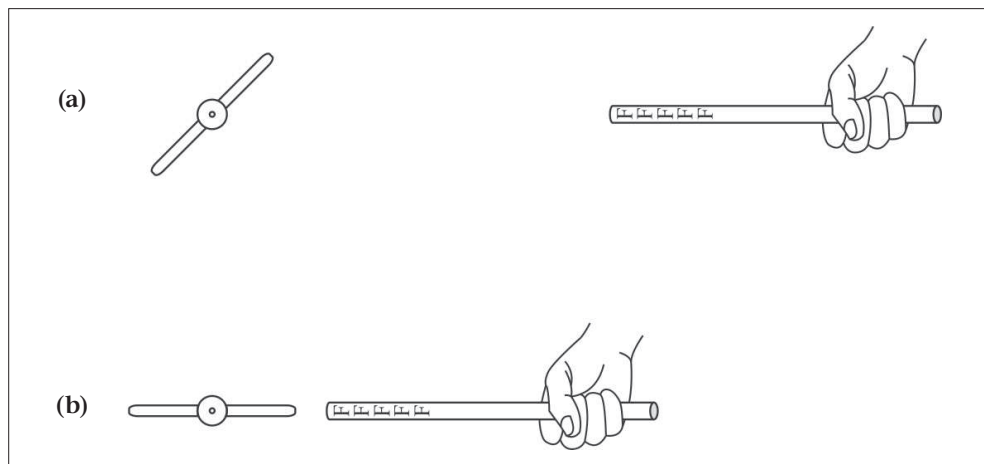



Figura 3.11. **(a)** Un versorium di metallo punta in una direzione arbitraria quando è lontano da un pezzo di plastica sfregato. **(b)** Quando la plastica è portata vicino ad esso, il versorium è orientato da essa, e punta costantemente verso la plastica.

Questo esperimento mostra che la plastica sfregata influenza i corpi vicini, come visto nell'Esperimento 2.1. Ma ci sono due differenze principali tra questi due esperimenti. La prima differenza è che nell'Esperimento 2.1 c'era il movimento dei piccoli pezzi di carta. Nel presente esperimento solo il versorium cambia direzione, mentre il suo centro rimane in quiete sopra il perno. La seconda differenza è che il versorium si muove più facilmente rispetto ai pezzi di carta. Ciò vuol dire che alcuni oggetti sfregati non sono in grado di attirare a sé corpi leggeri, ma possono far muovere i versorium di metallo.

Il versorium rileva l'elettrizzazione debole meglio di quanto facciano pezzi di carta o di paglia. Gilbert utilizzò questa grande sensibilità per scoprire molti nuovi oggetti elettrici, vale a dire, oggetti strofinati che possono attrarre o orientare altri materiali posti nelle loro vicinanze. Gilbert descrisse il versorium come segue[10]:

> Ora, al fine di comprendere chiaramente con l'esperienza come tale attrazione si svolge, e cosa tali sostanze possono essere perché attraggano altri corpi (e come nel caso di molte di queste sostanze elettriche, anche se i corpi influenzati da loro propendono verso di loro, ma a causa della debolezza dell'attrazione essi non tendono nettamente a loro, ma sono facilmente fatti salire), costruisciti un ago rotante (elettroscopio-*versorium*) di qualsiasi tipo di metallo, lungo tre o quattro dita, abbastanza leggero, e mettilo in bilico su una punta acuminata alla maniera di un puntatore magnetico. Porta vicino ad una sua estremità un pezzo di ambra o una gemma, leggermente strofinati, puliti e lucenti: subito lo strumento ruota.

La parola *elettroscopio* in questa citazione è stato introdotta da Mottelay nella sua traduzione in inglese dell'opera di Gilbert. Non appare nell'originale testo latino, in cui è utilizzata solo la parola *versorium*[11]. La parola *elettroscopio* non appare nemmeno nella traduzione di Thompson del libro di Gilbert[12]. Mottelay utilizzò la parola "elettroscopio" con il significato che questo strumento poteva indicare, mediante il suo orientamento, quali oggetti si comportavano come l'ambra dopo essere stata strofinata. *Elettroscopio* è il nome generico di

qualsiasi dispositivo che è sensibile abbastanza da rilevare una forza o momento torcente di origine elettrica. In questo libro, d'altra parte, riserveremo il nome elettroscopio specificamente allo strumento discusso nella Sezione 6.1. Abbiamo ora un secondo criterio per dire che una plastica o un altro materiale è *elettricamente neutro*. Il primo criterio è stato presentato nell'Esperimento 2.1, vale a dire, quello di non attirare corpi leggeri. Il secondo criterio è quello di non produrre il moto di orientamento di un versorium di metallo quando il materiale viene posto vicino a una delle sue gambe. Nei seguenti esperimenti, è importante conservare una cannuccia o un righello di plastica neutra che non attrae corpi leggeri, né orienta i versorium di metallo. Tale cannuccia o righello non dovrebbero essere mai strofinati, perché saranno utilizzati come nostro standard di neutralità.

Fracastoro non descrisse come creò il perpendicolo, che venne prima del versorium di Gilbert. Possiamo solo immaginare come l'abbia fatto. Uno degli obiettivi del suo libro era lo studio del magnetismo. Voleva anche distinguere l'attrazione esercitata dall'ambra da quella esercitata da un magnete naturale. Forse egli strofinò un pezzo di ambra per eseguire un esperimento elettrico e casualmente notò che era in grado di far ruotare l'ago di una bussola. Siccome l'ambra non è magnetica, sia strofinata che non, egli deve aver concluso che questo orientamento della bussola fosse dovuto ad un'attrazione elettrica, analoga all'attrazione dei corpi leggeri con l'ambra strofinata. Egli potrebbe aver deciso quindi di fare aghi metallici analoghi agli aghi magnetici, ma non magnetizzati. Essi avrebbero ruotato verso un pezzo di ambra strofinata, ma non verso un magnete (supponendo che gli aghi fossero fatti di rame o di argento, ma non di ferro né di acciaio). Egli potrebbe aver creato così il primo strumento artificiale per lo studio dell'elettricità.

**Esperimento 3.2**

Muoviamo un magnete in prossimità di un versorium. Vediamo che solo i versorium fatti di acciaio, ferro, nichel, o di altri materiali ferromagnetici ruotano e si dirigono verso il magnete. Versorium fatti di altri materiali non sono influenzati dal magnete. Vediamo anche che molti metalli, come il rame e l'alluminio, non sono influenzati dal magnete. Lo stesso accade con la maggior parte dei materiali (carta, plastica, legno, ecc.).

Con questo esperimento possiamo distinguere interazione magnetica da interazione elettrica, come abbiamo fatto in precedenza con gli Esperimenti 2.6 e 2.7, ma ora, con una maggiore precisione.

## 3.4 È possibile mappare la forza elettrica?

È possibile mappare la forza elettrica esercitata da un corpo di plastica strofinato? Possiamo visualizzare in quale direzione una lunga cannuccia strofinata attrarrà un pezzo di carta collocato nelle vicinanze? In questa Sezione rispondiamo a questa domanda.

Negli esperimenti seguenti possiamo utilizzare diversi versorium contemporaneamente. Possiamo anche utilizzare un unico versorium che è posto successivamente in diverse posizioni intorno al corpo strofinato per ciascun esperimento. Nelle prossime figure mostriamo diversi versorium allo stesso tempo. È meglio utilizzare versorium piccoli, come quelli a base di piccole graffette per carta appoggiate su perni. Questi perni possono essere attaccati a diversi tappi o possono essere tutti inseriti in una tavola di polistirolo. Inizialmente lavoreremo solo con dei versorium di metallo.

**Esperimento 3.3**

Passiamo una cannuccia neutra vicino ai versorium, non succede nulla. Strofiniamo la punta di un'altra cannuccia di plastica. Poniamola ora alla stessa altezza del piano formato da più versorium su un tavolo. Osserviamo che essi girano e si rivolgono verso la punta della cannuccia strofinata (Figura 3.12). In questa figura il cerchio centrale con la lettera F

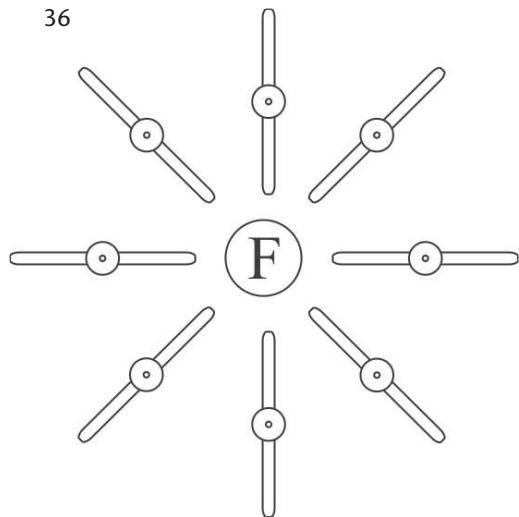



Figura 3.12. I versorium vicini sono orientati verso la punta strofinata della plastica.

indica la punta strofinata della cannuccia. L'influenza della cannuccia strofinata si estende per circa 10 cm. I versorium più distanti non sono evidentemente influenzati dalla cannuccia strofinata, a meno che essa non sia posizionata vicino ad essi.

Gli orientamenti indicati dai versorium rappresentano le direzioni della forza elettrica esercitata dalla plastica strofinata. Vale a dire che, se ci fossero pezzi di carta al posto dei versorium e se la forza attrattiva della cannuccia strofinata fosse abbastanza forte, gli orientamenti dei versorium indicherebbero le direzioni dei movimenti che verrebbero prodotti sui pezzi di carta per la presenza della plastica strofinata. Ciò significa che essi sarebbero attratti radialmente verso la punta strofinata. I versorium in questo esperimento si comportano allo stesso modo in cui la limatura di ferro si distribuisce intorno ad un magnete permanente, indicando le direzioni delle forze magnetiche esercitate dal magnete su altri poli magnetici o su piccoli pezzi di ferro.

### Esperimento 3.4

Esperimenti analoghi possono essere fatti per diverse configurazioni. Per esempio, possiamo strofinare una cannuccia di plastica per tutta la sua lunghezza e porla in verticale su una base, ad esempio intorno ad uno stuzzicadenti conficcato nella plastilina. I versorium vicini punteranno verso la cannuccia strofinata. Possiamo anche sostenere orizzontalmente la nostra cannuccia attaccandola alle estremità. La configurazione finale per i versorium in questo caso è come quella di Figura 3.13. La maggior parte dei versorium punteranno verso la plastica strofinata, mentre i versorium che sono più vicini alle sue estremità punteranno verso queste.

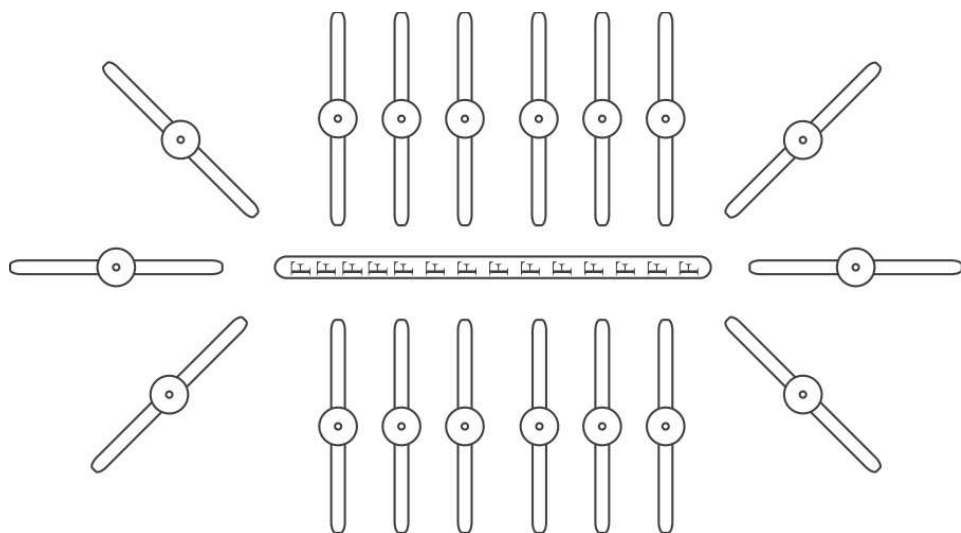



Figura 3.13. Orientamento dei versorium verso una cannuccia orizzontale che è stata strofinata per tutta la sua lunghezza.

**Esperimento 3.5**

Ora ripetiamo gli esperimenti utilizzando due cannucce sfregate e poste in verticale. In questo caso la configurazione dei versorium è mostrata in Figura 3.14. I cerchi con le lettere F rappresentano le porzioni delle cannucce che sono state sfregate e che sono alla stessa altezza dei versorium.

Questa configurazione indica una somma vettoriale dei momenti torcenti esercitati da ciascuna cannuccia di plastica sui versorium. La somma vettoriale produce la risultante data dalla regola del parallelogramma.

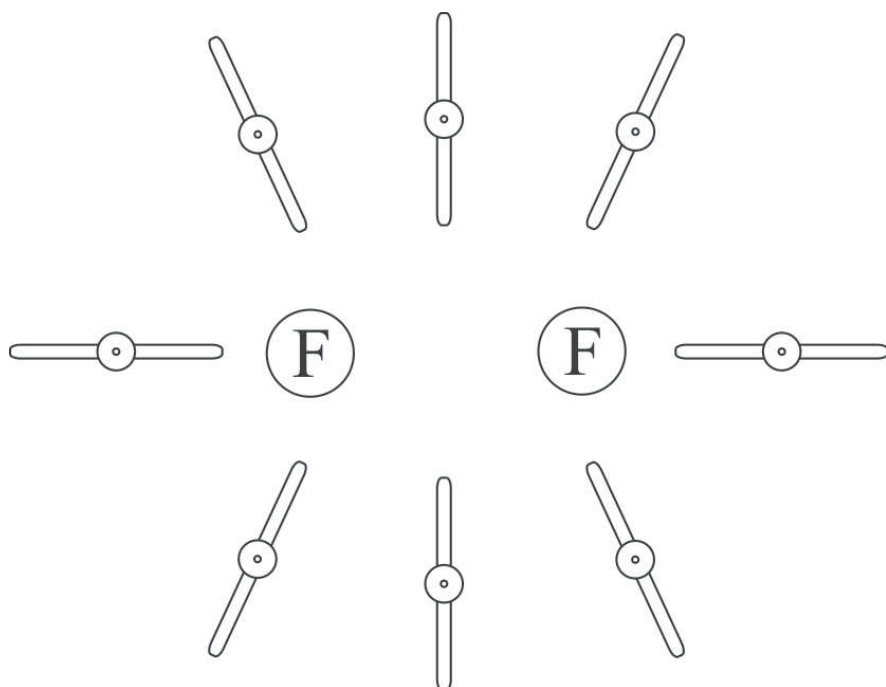



Figura 3.14. Orientamento dei versorium dovuto a due cannucce di plastica sfregate.

È di interesse storico il fatto che Gilbert non impiegò un versorium per mappare la forza elettrica come stiamo facendo qui. Egli invece usò aghi di bussola preparati per altro fine, cioè magnetizzati allo scopo di mappare la forza magnetica di una calamita. In Figura 3.15 mostriamo i risultati da lui ottenuti per magneti cilindrici e sferici[13]. Il magnete sferico orienta le bussole analogamente a quanto accade alle bussole sulla Terra, che puntano verso i poli Nord e Sud magnetici.

In altre parole, anche il piccolo magnete sferico ha due poli, che sono i punti sulla superficie della sfera vicino ai quali le bussole rimangono perpendicolari, mentre puntano verso il centro della sfera. È possibile disegnare i meridiani magnetici di questa sfera. Essi sono cerchi che collegano detti poli e che sono centrati nel centro della sfera. L'equatore magnetico è il grande cerchio con il suo piano perpendicolare alla linea che collega i due poli. Il centro dell'equatore magnetico coincide con il centro della sfera. Gilbert utilizzò questa analogia tra il comportamento di piccole bussole nei pressi di una piccola sfera magnetizzata e il comportamento di bussole normali sulla superficie della Terra per sostenere che la Terra è un enorme magnete. Con questo modello fu in grado di giustificare l'orientamento delle normali bussole, utilizzate nella navigazione terrestre.

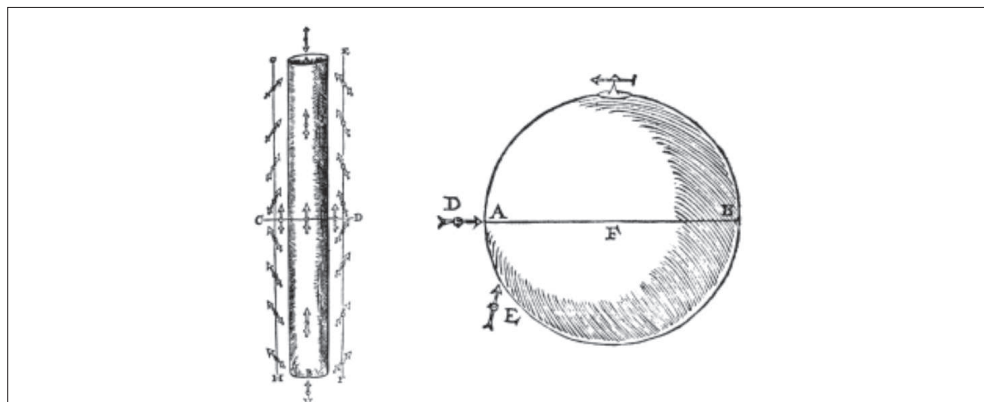



Figura 3.15. Mappatura della forza magnetica fatta da Gilbert utilizzando aghi magnetizzati avvicinati a magneti cilindrici e sferici. I poli di questo magnete sferico si trovano in A e B.

### 3.5 C'è azione e reazione in elettrostatica?

Finora abbiamo visto che l'ambra strofinata, o la plastica strofinata, attrae e muove oggetti leggeri e genera la rotazione dei versorium. Ora analizzeremo il processo contrario.

**Esperimento 3.6**

Una cannuccia di plastica neutra viene posta a contatto con una parete e lasciata lì, libera. Essa cade a terra (Figura 3.16 (a)). Strofiniamo un'altra cannuccia per la sua intera lunghezza con un pezzo di carta o con dei capelli. Poniamola poi in contatto con la parete e lasciamola lì come prima. Vediamo che ora rimane attaccata al muro nonostante l'attrazione gravitazionale della Terra (Figura 3.16 (b)). Lo stesso effetto si osserva quando essa tocca una finestra di vetro, un pezzo di mobile metallico o una lavagna di scuola. Può anche restare attaccata al soffitto!

Questo esperimento può anche essere usato per indicare quando una cannuccia è ben elettrizzata. Se si attacca alla parete dopo essere stato strofinata, ha buona elettrizzazione. Se scivola o cade a terra molto presto dopo essere stata strofinata e rilasciata, ciò indica che ha un'elettrizzazione debole. La maggior parte degli esperimenti in questo libro funzionano se usiamo cannucce di plastica ben elettrizzate. Si suggerisce il test del muro per scoprire materiali che possono immagazzinare una grande quantità di elettricità e anche i modi migliori o più efficienti per esercitare lo strofinio. Per esempio, possiamo ottenere una migliore elettrizzazione strofinando una cannuccia nei capelli, in un pezzo di carta o in un

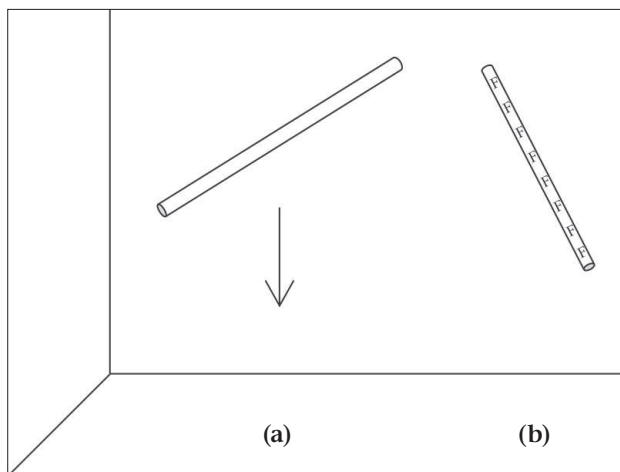



Figura 3.16. **(a)** una cannuccia di plastica neutra cade a terra dopo il rilascio. **(b)** Una cannuccia di plastica strofinata per tutta la sua lunghezza rimane attaccata a una parete dopo essere stata lasciata libera.

sacchetto di plastica? Il test qui descritto è un metodo molto utile, pratico e semplice per controllare l'elettrizzazione di una cannuccia di plastica.

Talvolta la cannuccia strofinata non si attacca alla parete anche dopo uno sfregamento molto intenso. Ciò può accadere con cannucce dense e pesanti. In tal caso, vuol dire che il peso della cannuccia è maggiore della forza elettrica come pure della forza di attrito tra la cannuccia strofinata e la parete. Di conseguenza, la cannuccia cadrà a terra. Quando ciò accade, è meglio cambiarla preferendo un altro tipo di cannuccia più sottile e più leggera.

La stessa prova può essere eseguita con un pezzo di sacchetto di plastica. Esso cadrà a terra dopo esser stato messo a contatto col muro e poi lasciato. Al contrario, se strofinato, il sacchetto di plastica si attaccherà alla parete per lungo tempo.

**Esperimento 3.7**

Un esperimento analogo può essere eseguito con un palloncino di gomma gonfiato. Quando lo poniamo a contatto con il muro e lo lasciamo libero, esso cade a terra. Ora strofiniamo il palloncino contro i capelli. Facciamo toccare la parte sfregata con la parete e lasciamolo lì, libero. Se è ben elettrizzato, si attaccherà al muro dopo il rilascio. Perché l'esperimento abbia successo, è opportuno strofinare energicamente il palloncino su una vasta area. Questi esperimenti sono molto semplici, ma i risultati sono notevoli. A volte la cannuccia può rimanere incollata alla parete per diversi minuti o anche per un'ora. Gli esperimenti indicano che la cannuccia strofinata è attratta dalla parete o dal soffitto. Essa risulta attratta da vari oggetti: muro, vetro, metallo, legno, ecc.

**Esperimento 3.8**

Ora eseguiamo alcuni esperimenti con un versorium di plastica, ossia come il versorium del secondo tipo prima descritto. Inizialmente lavoriamo con un versorium neutro che è libero di girare nei due sensi attorno ad un asse verticale passante per il suo centro. Avviciniamo diversi oggetti ad una delle gambe del versorium. Questi oggetti possono essere un dito, un cucchiaio o un filo di metallo, uno spiedino di legno per barbecue, un foglio di carta, o un pezzo di stoffa. Ogni corpo è portato nei pressi del versorium separatamente da tutti gli altri. Non succede nulla al versorium. Vale a dire che il suo orientamento arbitrario precedente non ne viene influenzato (Figura 3.17).

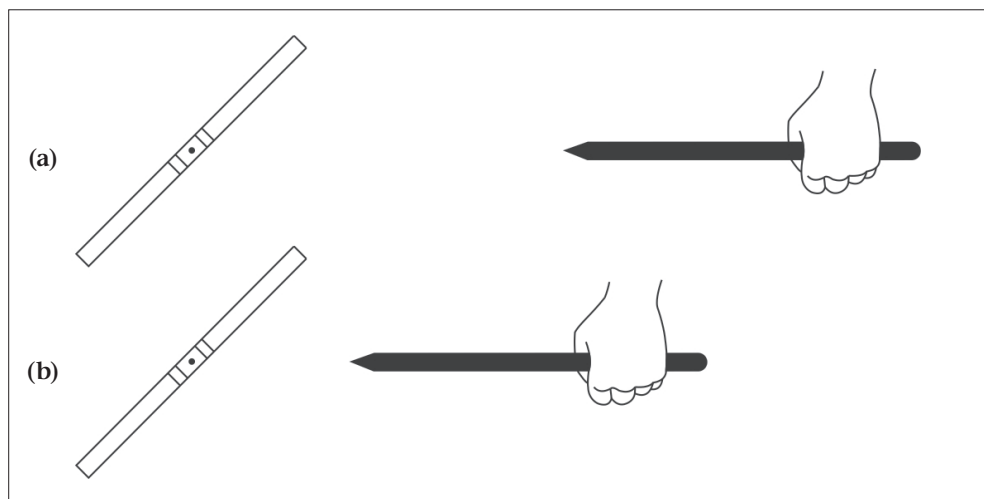



Figura 3.17. Un versorium di plastica neutro non è orientato quando un dito, un pezzo di metallo, legno, carta o stoffa è portato vicino ad una delle sue gambe.

Ora strofiniamo solo una delle gambe del versorium di plastica con un foglio di carta o un panno. Ripetiamo la procedura di prima, portando un dito nelle vicinanze di questa gamba strofinata. Possiamo anche avvicinare un pezzo di metallo o di legno alla gamba strofinata del versorium di plastica. Questa volta si osserva che la gamba strofinata del versorium di plastica ruota e va a puntare verso l'oggetto che si avvicina, come nella Figura 3.18.

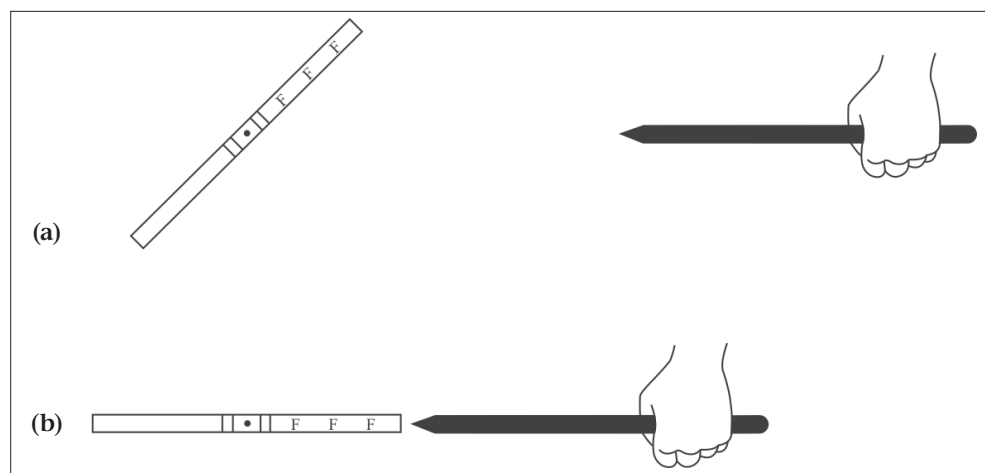



Figura 3.18. **(a)** Il versorium di plastica punta in una direzione arbitraria quando è lontano da uno spiedino di legno. **(b)** La gamba strofinata di un versorium di plastica è orientata verso uno spiedino di legno che è posto vicino ad essa.

Questo esperimento dimostra l'opposto rispetto all'Esperimento 3.1. In precedenza, un pezzo di plastica strofinato orientava un versorium di metallo. Ora troviamo che un dito, un pezzo di legno o di metallo orientano un versorium di plastica strofinato.

In alcuni casi un versorium di plastica che non è stato strofinato intenzionalmente è attratto da un dito o da un foglio di carta. Come abbiamo accennato prima, questo è dovuto al fatto che a volte la sola manipolazione del versorium di plastica è sufficiente per caricarlo elettricamente. Se questo accade, è un'indicazione che il versorium di plastica non è proprio neutro, ma che ha invece acquisito un po' di carica elettrica residua a causa della sua manipolazione. I versorium di plastica che sono veramente neutri sono quelli che non sono né attratti né orientati da questi oggetti.

### Esperimento 3.9

Nell'Esperimento 3.8 abbiamo osservato l'orientamento di un versorium di plastica, pur rimanendo il suo centro in quiete sul supporto. Il modo migliore per vedere un corpo di plastica strofinato attratto da un metallo è quello di lavorare con il terzo tipo di versorium (vedi Sezione 3.2.3), ma fatto ora di plastica, ad esempio una striscia di plastica sospesa al centro da un filo di seta o nylon. Più leggera è la striscia, più facilmente eseguirà un movimento d'insieme. D'altra parte, esso non può essere troppo corto, poiché abbiamo bisogno di strofinarlo sui nostri capelli, in un foglio di carta o in un panno. Una cannuccia di plastica funziona bene come versorium di questo tipo grazie alla sua lunghezza e al suo scarso peso. Se avviciniamo una mano, un foglio di carta, o una piastra metallica vicino al versorium neutro, nulla accade ad esso.

Strofiniamo ora metà del versorium di plastica (strofiniamo cioè una sola delle sue gambe) e lo posizioniamo appeso al filo di seta o nylon. Ancora una volta avviciniamo la

mano al versorium. Possiamo anche avvicinare un foglio di carta, uno spiedino di legno per barbecue, o una placca di metallo. Questa volta il versorium di plastica strofinato non solo gira verso l'oggetto che si avvicina, ma si muove anche nel suo complesso verso di esso. Ciò vuol dire che stanno agendo su di esso sia una coppia che una forza. Questo fa sì che sia attratto dall'oggetto che si avvicina.

Questo esperimento è l'opposto degli Esperimenti 2.1, 2.3, e 2.4. Abbiamo adesso un foglio di carta o una piastra metallica che attira un pezzo di plastica strofinato. Nel caso degli Esperimenti 2.1, 2.3 e 2.4, non è stato possibile osservare o rilevare questa azione reciproca per il fatto che la cannuccia di plastica, il righello o il pettine erano molto più pesanti dei pezzi di carta e degli altri piccoli oggetti. Inoltre, la mano di una persona non è abbastanza sensibile per rilevare la piccola forza esercitata dai pezzi di carta sulla cannuccia di plastica o sul pettine. Negli Esperimenti 3.8 e 3.9, d'altro canto, abbiamo uno strumento con una sensibilità molto maggiore. Ciò è dovuto al fatto che il peso del corpo di prova (in questo caso la striscia di plastica del versorium) è controbilanciato dal supporto sotto o sopra di esso. Siccome il peso del versorium di plastica è stato bilanciato da un'altra forza, è allora molto più facile vedere o rilevare la sua rotazione o il movimento laterale dovuto ad una influenza esterna.

### Esperimento 3.10

Il fatto che un corpo elettricamente carico sia attratto da altri corpi vicini ad esso (un dito, un pezzo di legno, o un pezzo di metallo), è stato utilizzato da Stephen Gray (1666-1736) nel 1720 per scoprire nuovi materiali elettrici (cioè, i materiali che si comportano come l'ambra).

Gray strofinò diversi materiali facendoli scorrere attraverso le dita. Dopo questa procedura, controllò se essi risultavano attratti da un dito o da un altro corpo solido, posto in prossimità. Citiamo qui sezioni del suo lavoro che descrivono esperimenti che possono essere facilmente riprodotti[14]:

> Avendo spesso osservato negli esperimenti elettrici realizzati con un tubo di vetro [strofinato] e una piuma legata all'estremità di un bastoncino, che le sue fibre erano state attirate verso il tubo e che dopo, quando quello [il tubo] era stato ritirato, molte di esse venivano attratte dal bastone, come se essa [la piuma] fosse stata un corpo elettrico, o come se ci fosse stato qualche tipo di elettricità comunicata al bastone o alle piume; questo mi ha fatto pensare, nel caso in cui una piuma fosse passata attraverso le mie dita, se non si possa produrre lo stesso effetto, ottenendo un certo grado di elettricità. Ed è accaduto proprio così alla mia prima prova, essendo le piccole fibre lanuginose della piuma vicine al calamo attratte dal mio dito quando è stato posto vicino ad essa: [...] sono poi andato avanti col provare se i capelli avevano o no la stessa proprietà, prendendone uno dalla mia parrucca e passandolo 3 o 4 volte tra le dita, o meglio tra il mio pollice e l'indice, e ho subito trovato che veniva verso il mio dito alla distanza di mezzo pollice [1,3 cm] [...].
>
> Essendo riuscito così bene in questi [esperimenti], continuai impiegando maggiori quantità degli stessi materiali, come pezzi di nastro di seta fine nonché grossolana di diversi colori, e trovai che prendendo un pezzo di uno qualsiasi di questi lungo circa mezza iarda [45 cm], e tenendone l'estremità in una mano e tirandolo mediante l'altra mano tra pollice e dita, esso acquisiva elettricità, in modo che se la mano fosse tenuta in prossimità dell'estremità inferiore di esso, sarebbe attratto da essa alla distanza di 5 o 6 pollici [13 o 15 cm]; ma in alcuni casi l'elettricità sarebbe molto più debole rispetto ad altri, ed ho ipotizzato che la ragione sia da spiegarsi col fatto che il nastro poteva aver assorbito un po' di particelle acquose dall'aria umida, che ho verificato essere [vero] provando tale occasione; perché ogniqualvolta ebbi ben riscaldato il nastro col fuoco, non si verificò mai che non fosse fortemente elettrico.

### 3.6 Fabri e Boyle scoprono la mutua interazione elettrica

Gli esperimenti dal 3.6 al 3.10 sono molto importanti. Essi dimostrano che vi è una mutua interazione tra la plastica strofinata e gli oggetti che la circondano. La plastica strofinata attrae questi oggetti, che a loro volta attirano la plastica strofinata. Gilbert non eseguì esperimenti con un versorium strofinato fatto di ambra o di qualsiasi altro materiale elettrico (cioè, di qualsiasi materiale che si comporta come l'ambra, secondo la sua definizione). Ciò, forse, contribuì alla sua convinzione erronea che non c'erano mutue interazioni tra ambra strofinata e oggetti circostanti. Lo stesso punto di vista erroneo fu adottato da Girolamo Cardano (1501-1576) prima di Gilbert e fu anche menzionato da Niccolò Cabeo (1596-1650) dopo Gilbert. Tuttavia, essi erano tutti consapevoli della mutua interazione tra due magneti o tra un magnete e un pezzo di ferro. Per caratterizzare questa mutua interazione magnetica, Gilbert adottò i nomi *coizione* o *confluenza*, mentre per l'azione elettrica usò il termine *attrazione*[15].

Ora sappiamo che l'azione elettrica è anch'essa reciproca e quindi può essere caratterizzata dall'espressione *interazione elettrica*. L'interazione elettrica si riferisce sia alla forza risultante esercitata da un oggetto su un altro (facendoli muovere rispetto al suolo), che alla coppia risultante esercitata da un oggetto su un altro (facendoli ruotare rispetto al suolo). Quando si parla di forza elettrica, va tenuto presente che non solo l'oggetto A attrae l'oggetto B; pure l'oggetto B attrae l'oggetto A nella direzione opposta. Allo stesso modo, se l'oggetto A esercita una coppia elettrica sull'oggetto B, l'oggetto B causerà una coppia opposta sull'oggetto A. Se l'oggetto A tende a ruotare in senso orario grazie all'influenza dell'oggetto B, allora B tenderà a ruotare in senso antiorario a causa dell'influenza di A.

Figura 3.19. Honoré Fabri (1607-1688).

I primi a scoprire che l'azione elettrica è un'azione reciproca tra l'ambra strofinata e gli oggetti che la circondano furono Honoré Fabri (1607-1688) nel 1660 (Figura 3.19), e Robert Boyle (1627-1691) nel 1675 (Figura 3.20)[16].

Fabri divenne membro corrispondente dell'Accademia del Cimento nel 1660. Tra i membri dell'Accademia ci furono G. A. Borelli (1608-1671), Vincenzo Viviani (1622-1703) – che era un discepolo di Galileo (1564-1642) – e F. Redi (1626-1697/8). Essa fu fondata nel 1657 e durò 10 anni. Le opere dell'Accademia, chiamate *Saggi*, furono pubblicate nel 1667. Gli studi di elettricità fatti in questa Accademia iniziarono nel 1660. Tra i suoi rapporti troviamo le seguenti osservazioni[17]:

> Si crede comunemente che l'*ambra* attragga i piccoli corpi a sé; ma l'azione è in effetti *reciproca*, non più propriamente appartenente all'*ambra*, che ai corpi spostati, dai quali essa stessa è attratta.

Figure 3.20. Robert Boyle (1627-1691).

Secondo Heilbron, gli accademici si accertarono di tale fatto dopo aver appeso un pezzo di ambra strofinato ad un filo o appoggiandolo su un perno. L'ambra allora, secondo gli accademici, "si piegava leggermente verso quei piccoli corpi, i quali allo stesso modo *in proporzione* si presentavano ad essa, e prontamente obbedivano al suo richiamo". Nello stesso anno Magalotti (1637-1712) confutò le tesi di Cabeo; Cabeo aveva respinto la natura reciproca delle interazioni elettriche. Magalotti disse[18]: "Le sue opinioni sono confutate dall'esperienza, perché il versorium di ambra segue tutti i corpi presentati ad esso". Secondo Heilbron, Magalotti ottenne queste informazioni da Fabri. Le relazioni precedenti dell'Accademia del Cimento erano anche dovute a Fabri, secondo Heilbron. C'è un manoscritto contenente bozze per una sezione sull'elettricità dei *Saggi*, nella lettera di Fabri, dove si menziona che "un pezzo di ceralacca sospeso liberamente e poi strofinato avvicina altri corpi"[19]. Da queste affermazioni possiamo arguire che gli esperimenti di Fabri erano in qualche modo simili a quelli presentati nella Sezione 3.5, in cui abbiamo usato la plastica strofinata invece dell'ambra strofinata o della ceralacca strofinata.

Boyle presentò i suoi risultati sull'azione reciproca tra ambra strofinata e oggetti vicini nel 1675. Egli può avere appreso questo dai rapporti di Fabri o averlo scoperto indipendentemente. Egli credeva che l'ambra emettesse un effluvio materiale responsabile dell'attrazione di corpi leggeri, forse per il fatto che l'effluvio poteva essere appiccicoso ed elastico.

Per quanto riguarda l'attrazione esercitata dall'ambra, egli scrisse ciò che segue[20]:

> Che non ci sia alcuna simpatia particolare tra un elettrico e un corpo sul quale esso opera, dalla quale l'attrazione elettrica dipenda, sembra più probabile, perché l'ambra, per esempio, non attrae solo un tipo determinato di corpi, come la calamita col ferro, e quei corpi in cui esso abbonda; ma per quanto ho finora provato, essa attira indifferentemente tutti i corpi, che siano posti entro una certa distanza da essa, (perché il mio migliore pezzo di ambra non attira solo sabbia e polveri minerali, ma limatura di acciaio e rame, e persino oro battuto) / a patto che siano minuti o abbastanza leggeri, tranne forse che si tratti di fuoco.

In un altro passaggio arriva l'intuizione cruciale[21]:

> Abbiamo trovato sperimentalmente che un pezzo vigoroso e ben eccitato di ambra attrarrà, non solo la polvere di ambra, ma anche frammenti meno minuti di essa. E siccome in molti casi un opposto si dirige verso l'altro, così questa prova ne suggerì un'ulteriore che, in caso di buon successo, potrebbe probabilmente dimostrare che nell'attrazione elettrica non solo sono emessi *effluvi* dal corpo elettrico, ma questi *effluvi* si legano al corpo da attrarre e che in tal modo, le stringhe viscose intervenienti, da supporsi composte da questi *effluvi* adesivi, quando la loro agitazione cessa, sono contratti o ristretti all'interno verso entrambe le estremità, quasi come fa una corda di liuto estremamente tirata quando le è consentito di ritirarsi in / dimensioni più brevi. Ma era molto più facile effettuare la congettura che l'esperimento richiesto per esaminarla. Perché ci rendemmo conto che non era semplice sospendere un elettrico, abbastanza grande e vigoroso, in una maniera tale che poteva essere eccitato, mentre sospeso, ed essere così ben bilanciato, che una così debole forza come quella con cui esso attira corpi leggeri sia in grado di procurare un movimento locale all'intero corpo stesso. Ma dopo alcuni tentativi infruttuosi con altri elettrici, ho dovuto ricorrere al pezzo molto vigoroso di ambra strofinata, già menzionato, e quando con l'aiuto di un po' di cera lo abbiamo sospeso ad un filo di seta, abbiamo eccitato molto bene uno dei bordi smussati con una specie di grande portaspilli coperto con una stoffa di lana grezza e nera, e poi portato l'elettrico, il prima possibile, a stabilizzarsi nonostante pendesse liberamente alla fine della stringa. Abbiamo scelto questo metodo di sfregamento

sul bordo dell'ambra / per più di un motivo; perché se avessimo eccitato il lato piatto, l'ambra non avrebbe potuto avvicinare il corpo che gli era stato strofinato contro senza modificare la posizione di tutto l'elettrico, e, ancor peggio, senza farlo muovere (contrariamente alla natura dei corpi pesanti) un po' verso l'alto; dato che l'ambra ha, a causa della sua sospensione, parti controbilanciate a vicenda; per far avvicinare il bordo eccitato ad un altro corpo, quel bordo non ha bisogno affatto di ascendere, ma solo di essere spostato in senso orizzontale, e a tale modo di muoversi la gravità dell'elettrico (che la stringa ha impedito di muoversi verso il basso) potrebbe essere di poco o di nessun impedimento. E conformemente a questo abbiamo scoperto che se, appena l'elettrico sospeso e ben strofinato si fosse sistemato liberamente, noi applicassimo al bordo strofinato, ma senza toccarlo, il portaspilli prima menzionato, che, in ragione delle sue *superfici* ruvide e della sua porosità, era adatto / a fissare gli effluvi elettrici, il bordo sarebbe stato manifestamente attratto di lato dal cuscino fermamente tenuto, e se questo fosse stato spostato lentamente, lo avrebbe seguito per bene; e quando questo corpo non lo avesse trattenuto più, sarebbe tornato alla posizione in cui si era stabilito prima. E questo potere di avvicinare il cuscino in virtù dell'operare dei suoi propri vapori, era così durevole nel nostro forte pezzo di ambra, che una volta eccitato, sono stato in grado di fargli seguire il cuscino non meno di dieci o undici volte.

Gli esperimenti di Fabri e Boyle dimostrarono che non solo l'ambra strofinata orientava e attraeva oggetti leggeri, ma che anche l'ambra strofinata e la ceralacca strofinata erano orientati e attratti da altri oggetti. I loro esperimenti sono diametralmente opposti alle osservazioni di Fracastoro, descritte nella Sezione 3.1. Fracastoro sospese piccoli pezzi di ambra e argento nel suo perpendicolo ed osservò che essi erano attratti da un altro pezzo di ambra strofinato portato vicino a loro, come in Figura 3.2. Fabri e Boyle, d'altra parte, osservarono che un'ambra strofinata e sospesa ad un filo era attratta e orientata da un altro oggetto posto vicino ad essa, come nella Figura 3.21.

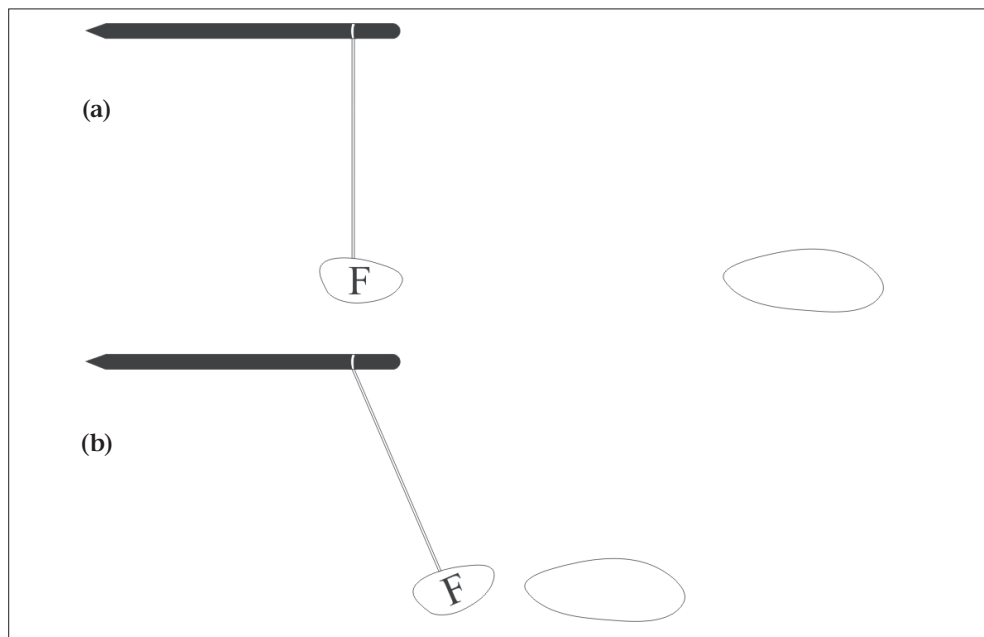



Figura 3.21. **(a)** Un pezzo di ambra strofinato, rappresentato da F, pende verticalmente quando è lontano da qualsiasi oggetto neutro. **(b)** Il pezzo di ambra strofinato F è attratto da un corpo neutro portato vicino ad esso.

Questa è una scoperta di fisica molto importante. Essa dimostra che vi è l'azione e la reazione in elettrostatica. Vi è, cioè, una mutua interazione elettrica tra l'oggetto strofinato e gli oggetti vicini. L'oggetto strofinato esercita una forza e una coppia su oggetti neutri circostanti. E questi oggetti a loro volta esercitano una forza opposta ed una coppia opposta sull'oggetto strofinato.

Nel 1660 e 1675 Fabri e Boyle conclusero sperimentalmente che c'erano azione e reazione in elettricità. Queste erano prove solo qualitative, come gli esperimenti descritti in questa Sezione. Esse non misuravano la forza esercitata dall'ambra o la forza opposta esercitata dai corpi circostanti.

### 3.7 Newton e l'elettricità

Come abbiamo visto nella Sezione 3.6, tra il 1660 e il 1675 Fabri e Boyle scoprirono che le azioni elettriche sono reciproche. Pochi anni dopo, nel 1687, Isaac Newton (1642-1727) (Figura 3.22), introdusse il principio di azione e reazione come uno dei pilastri di tutta la fisica.

Questo è il terzo assioma o legge del moto che egli introdusse nel suo famoso libro *Principi Matematici della Filosofia Naturale*, conosciuto anche con il nome latino, *Principia*. Il suo terzo assioma, o terza legge del moto, fu formulato come segue[22]:

> Ad ogni azione corrisponde sempre una reazione uguale e contraria: ossia, le azioni di due corpi sono sempre uguali fra loro e dirette verso parti opposte.

È importante notare che Newton riteneva che questo assioma dovesse essere valido per tutte le interazioni note: gravitazionale, elettrica, magnetica, elastica, forze di contatto, attrito, collisioni, ecc. Inoltre, per Newton questo principio aveva sia un significato qualitativo che un aspetto quantitativo molto preciso, cioè che ad ogni azione corrisponde sempre una reazione di uguale intensità. Inoltre, esse sono allineate lungo la linea retta che collega i due corpi, dirette nelle direzioni corrispondenti. Con azione e reazione Newton si riferiva alle forze reciproche tra i due corpi, che vengono misurate quantitativamente attraverso le variazioni del momento lineare di ciascun corpo nell'unità di tempo. Newton chiamava quantità di moto quello che noi chiamiamo momento lineare, dato che esso è proporzionale alla massa del corpo moltiplicata per la sua velocità relativa allo spazio assoluto. Questo lavoro fondamentale di Newton segna una nuova epoca nel campo della fisica, un'epoca in cui la scienza raggiunse un elevato grado di precisione.

Figura 3.22. Isaac Newton (1642-1727). Questo è il più famoso ritratto di Newton. È stato fatto da Godfrey Kneller (1646-1723) nel 1689. Newton appare con i suoi capelli naturali, al culmine della sua carriera scientifica, due anni dopo la pubblicazione dei *Principia*.

Nei *Principia* Newton presentò forze di collisione e di contatto come esempi di interazioni che soddisfano il principio di azione e reazione. Per quanto riguarda le azioni a distanza, egli citò gli esempi di gravità e magnetismo, discutendo quest'ultimo con le seguenti parole[23]:

Per quanto riguarda le attrazioni, dimostro brevemente la cosa in questa maniera. Supponiamo che un ostacolo sia interposto per impedire il contatto di due qualsiasi corpi A, B, che si attraggono tra loro; quindi se uno dei corpi, per esempio A, è più attratto verso l'altro corpo B di quanto l'altro corpo B lo sia verso il precedente A, l'ostacolo sarà più fortemente spinto dalla pressione del corpo A che dalla pressione del corpo B e quindi non rimarrà in equilibrio: ma la pressione più forte prevarrà e farà muovere il sistema dei due corpi, insieme con l'ostacolo, in linea retta verso la zona nella quale si trova B; e in spazi liberi, andrà avanti *all'infinito* con un moto continuamente accelerato; il che è assurdo e contrario alla prima Legge. Infatti, secondo la prima Legge, il sistema deve restare nel suo stato di quiete, o di moto uniforme lungo una retta; e pertanto i corpi devono ugualmente premere l'ostacolo ed essere ugualmente attratti uno dall'altro. Ho fatto l'esperimento sulla calamita e il ferro. Se questi, posti a distanza in recipienti appropriati, vengono fatti fluttuare l'uno verso l'altro in acqua stagnante, nessuno dei due spingerà l'altro; ma, essendo ugualmente attratti, sosterranno ognuno la pressione dell'altro, e resteranno infine in equilibrio.

Nella Query 8 del suo libro *Optics*, Newton descrisse esperimenti sull'elettricità[24]:

Qu. 8. Non è vero che tutti i corpi fissi[25], quando riscaldati oltre un certo grado, emettono luce e brillano; e non è questa emissione causata dai moti vibratori delle loro parti? E non è forse vero che tutti i corpi che abbondano di parti terrestri, e in particolare di quelle sulfuree, emettono luce tutte le volte che quelle parti sono sufficientemente agitate; sia che l'agitazione sia effettuata per calore, o per strofinio, o per percussioni, o per putrefazione, o per qualsiasi azione vitale, o qualsiasi altra causa? [...] Così anche un globo di vetro di circa 8 o 10 pollici di diametro, montato su un supporto nel quale esso possa essere rapidamente ruotato intorno al proprio asse, ruotando brillerà dove esso strofina contro il palmo della mano di qualcuno se applicato ad esso. E se al tempo stesso un pezzo di carta bianca o panno bianco, o la punta del dito di qualcuno si terrà alla distanza di circa un quarto di un pollice o mezzo pollice da quella parte del vetro in cui c'è più movimento, il vapore elettrico che viene eccitato dall'attrito del vetro contro la mano (correndo incontro alla carta, alla stoffa bianca o al dito) verrà messo in una tale agitazione da emettere luce e farà in modo che la carta o stoffa bianca o il dito appaiano luccicanti come una lucciola; e muovendosi fuori dal vetro si spingerà a volte contro il dito in modo da essere sentito. E le stesse cose sono state trovate strofinando un lungo e grosso cilindro di vetro o ambra con una carta tenuta nella propria mano e continuando l'attrito fino a quando il vetro non si fosse riscaldato.

L'elettricità è anche menzionata nella Query 31, in cui Newton sottolinea le mutue interazioni a distanza tra i corpi[26]:

Qu. 31. Non hanno le piccole particelle dei corpi determinati poteri, virtù, o forze, grazie a cui agiscono a distanza, non solo sui raggi di luce per rifletterli, rifrangerli, e fletterli, ma anche le une sulle altre per produrre una gran parte dei fenomeni della Natura? Perché è ben noto che i corpi agiscono l'uno sull'altro per mezzo dell'attrazione della gravità, del magnetismo e dell'elettricità; e questi casi mostrano il tenore e il corso della Natura, e fanno sì che non sia improbabile che ci possano essere poteri più attrattivi di questi. Perché la Natura è molto coerente e conforme a se stessa. Non prendo in considerazione qui come queste attrazioni possano essere eseguite. Quello che io chiamo attrazione può essere eseguita per impulso, o con altri mezzi a me sconosciuti. Io uso quella parola qui solo per significare in generale qualsiasi forza con cui corpi tendono l'un l'altro, qualunque sia la causa. Perché dobbiamo imparare dai fenomeni della Natura quali corpi si attraggono l'un l'altro e quali sono le leggi e le proprietà dell'attrazione, prima di indagare la causa per la quale l'attrazione si presenta. Le attrazioni di gravità, magnetismo ed elettricità raggiungono distanze

> molto rilevanti e così sono state osservate ad occhio nudo, e ce ne potrebbero essere altre che agiscono a distanze così piccole che finora sono sfuggite all'osservazione; e forse l'attrazione elettrica potrebbe arrivare a tali piccole distanze, anche senza essere eccitata per attrito.

Egli menzionò l'attrazione elettrica anche nei *Principia*. Per esempio, nel Libro III[27]:

> Proposizione 7. Teorema 7
>
> *Che ci sia un potere di gravità riguardante tutti i corpi, proporzionale alle diverse quantità di materia che essi contengono.*
>
> [...]
>
> Cor. I. Pertanto la forza di gravità verso qualsiasi intero pianeta scaturisce, ed è composta, dalle forze di gravità verso tutte le sue parti. Le attrazioni magnetiche ed elettriche ci offrono esempi di questo; perché tutte le attrazioni verso l'insieme derivano dalle attrazioni verso le singole parti. [...]

Anche nello Scolio Generale alla fine del libro egli menzionò l'elettricità, sottolineando ancora una volta le interazioni reciproche tra corpi[28]:

> E ora potremmo aggiungere qualcosa riguardo a quello spirito sottilissimo che pervade e si trova nascosto in tutti i grandi corpi; mediante la forza e l'azione del quale le particelle dei corpi a brevi distanze si attraggono a vicenda ed aderiscono, se contigue; e corpi elettrici operano a distanze maggiori, sia respingendo sia attraendo i corpuscoli vicini; e la luce viene emessa, riflessa, rifratta, incurvata, e riscalda i corpi; e tutta la sensazione è eccitata, e le membra dei corpi degli animali si muovono al comando della volontà, cioè dalle vibrazioni di questo spirito, reciprocamente propagate lungo i filamenti solidi dei nervi, dagli organi esterni della percezione al cervello, e dal cervello nei muscoli. Ma queste sono cose che non possono essere spiegate in poche parole, né abbiamo sufficiente abbondanza di esperimenti che è richiesta per una determinazione e dimostrazione accurata delle leggi con cui questo spirito elettrico ed elastico opera.

Queste citazioni mostrano che, nella mente di Newton, l'elettricità ricopriva un ruolo fondamentale nei fenomeni naturali.

## Note

1 [Ben98, p. 241].
2 [Zan81].
3 [Gli33] e [Hei99, p. 175].
4 "Nos enim praesentibus multis ex nostris medicis experientiam multorum secimus, perpendicolo bene & concinne aptato, quale est in nauigatoria pyxide, ac manifeste vidimus magnete trahere magnete, ferrum ferrũ, tum magnetem trahere ferrum, ferrum magnetem porro electrum parua electri frustula rapere, argentum attrahere argentum, &, quod valde inirati fuimus, magnetem vidimus argentum trahere: item Electrum non solum furculos & paleas mouere ad se, sed & argentum," [Fra55, p. 85 verso]. In italiano è stato tradotto da [Gli33].
5 [Sas02].
6 [Gil78, pp. 28-29].
7 [Gil78, pp. 27-28].
8 [Ass08] e [Ass10c].
9 Comunemente detta "fermacampione", cioè un fermaglio metallico che assicura assieme più fogli di carta. L'oggetto ha due alette, le quali, dopo essere passate attraverso fori, vengono separate e piegate. [n.d.t.]
10 [Gil78, pp. 27-28].
11 [Gil00, pp. 48-49 e Glossario] e [Hea67].
12 [Gil00, pp. Vj e 48-49] e [Hea67].
13 [Gil78, pp. 10 e 82].

[14] [Grab, pp. 104-106].
[15] [Gil78, pp. 26 e 34] e [Hei99, pp. 174-182].
[16] [Hei99, pp. 195-205].
[17] [Hei99, p. 201].
[18] [Hei99, p. 201].
[19] [Hei99, p. 202].
[20] [Boy00, p. 515].
[21] [Boy00, p. 516].
[22] [New52a, p.14].
[23] [New52a, p. 22].
[24] [New52b, pp. 516-517]
[25] non evaporabili [n.d.t.].
[26] [New52b, pp. 531].
[27] [New52a, pp. 281-282].
[28] [New52a, p. 372].

# Capitolo 4

# Attrazione e repulsione elettrica

### 4.1 Esiste la repulsione elettrica?

Tutti gli esperimenti descritti finora in questo libro hanno affrontato l'attrazione tra i corpi. Ma i fenomeni elettrici sono caratterizzati anche dalla repulsione.

**Esperimento 4.1**

Un modo molto semplice per osservare la repulsione elettrica è con una striscia ricavata da un sacchetto di plastica. Tagliamo una striscia larga 2 cm e lunga da 10 a 20 cm. Appendiamola sopra un supporto orizzontale (un spiedino di legno, una matita, o un dito). All'inizio le due metà della striscia neutra pendono verticalmente parallele tra loro, come in Figura 4.1 (a). Ora strofiniamo entrambe le metà con lo stesso materiale (per esempio, facendo passare ogni metà attraverso le nostre dita, o strofinandole con un pezzo di carta). Dopo il rilascio esse si respingono a vicenda, con le due metà che si allontanano lateralmente (Figura 4.1 (b)).

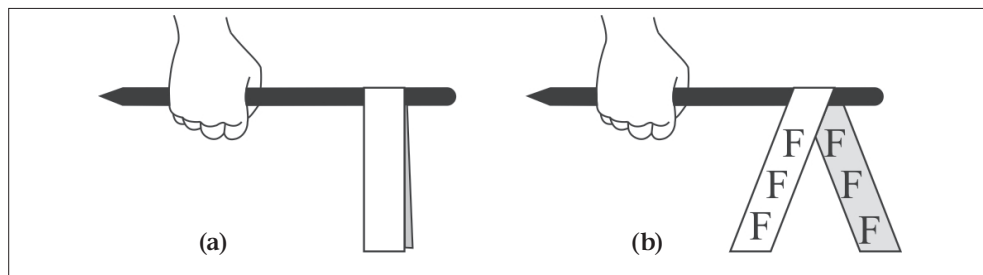



Figura 4.1. **(a)** Una striscia di plastica neutra sospesa verticalmente su uno spiedino orizzontale di legno. **(b)** Repulsione tra le due metà di una striscia di plastica strofinata.

È anche possibile vedere questo effetto con due pezzi di una cannuccia di plastica, ciascuno di circa 5 cm di lunghezza. Un'estremità di ciascuna cannuccia è legata a un capo di un filo di seta o di nylon lungo 10 o 20 cm. Il filo è in seguito appeso, al suo centro, su un supporto orizzontale in modo tale che all'inizio entrambe le cannucce neutre rimangano affiancate verticalmente, con le loro estremità libere dirette verso il basso. Quando le due cannucce sono strofinate con lo stesso materiale, esse cominciano a respingersi a vicenda dopo il rilascio, muovendosi verso l'esterno. Più sottile è il supporto orizzontale, più visibile sarà il fenomeno.

Un terzo caso prevede l'uso di palloncini di gomma gonfiati. Due palloncini, sorretti da fili, sono inizialmente appesi in modo che si tocchino l'un l'altro. Quando i palloncini sono strofinati sui nostri capelli, essi cominciano a respingersi a vicenda. Essi si allontanano l'uno dall'altro e non si toccano più.

In tutti questi casi osserviamo la repulsione di corpi fatti dello stesso materiale (due strisce di plastica, due cannucce, o due palloncini di gomma) che sono stati strofinati con lo stesso materiale. Questo è un fenomeno nuovo che non abbiamo osservato nei precedenti esperimenti.

## Esperimento 4.2

Utilizzando due versorium di plastica possiamo osservare l'orientamento elettrico dovuto alla repulsione. Strofiniamo una sola gamba di ogni versorium con lo stesso materiale, per esempio con un foglio di carta o tra i nostri capelli. I due versorium sono collocati fianco a fianco, paralleli tra loro, con le gambe sfregate che puntano nella stessa direzione.

Dopo il rilascio dallo stato di quiete le gambe sfregate si respingono a vicenda. Come conseguenza di questa repulsione, i versorium ruotano rispetto ai loro assi verticali in modo tale che alla fine del processo, le gambe sfregate rimangono allineate ma alla massima distanza possibile tra loro (Figura 4.2).

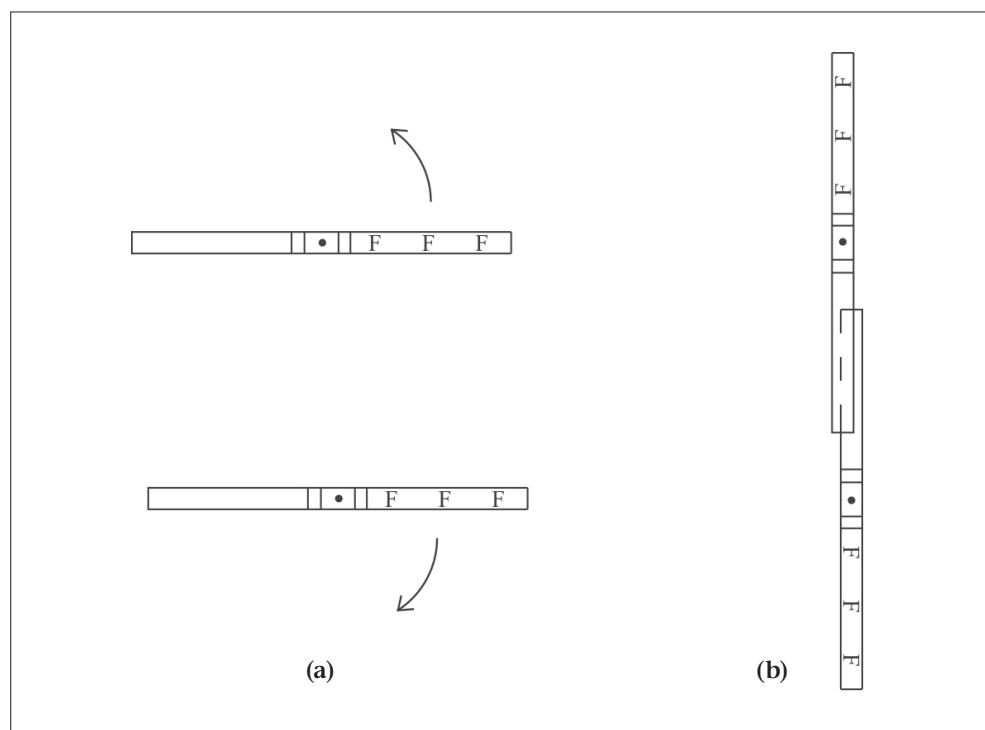



Figura 4.2. **(a)** Repulsione tra le gambe sfregate di due versorium di plastica, visti dall'alto, affiancati lungo direzioni parallele. **(b)** Orientamento all'equilibrio finale dei due versorium.

Questo effetto è più visibile se i due versorium sono inizialmente molto vicini l'uno all'altro. Al fine di evitare il contatto tra le due gambe che non sono state strofinate dopo che i versorium hanno ruotato, è possibile posizionare uno dei versorium leggermente più in alto rispetto all'altro in modo tale che dopo che la repulsione ha effetto, la gamba di un versorium sarà sopra la gamba dell'altro.

Va inoltre osservato che i versorium ruotano in direzioni opposte dopo il rilascio. Mentre uno ruota in senso orario, l'altro ruota in senso antiorario. Questo significa che la coppia esercitata dal versorium A sul versorium B è opposta alla coppia esercitata dal versorium B sul versorium A.

Per ricordare più facilmente quale gamba è stata strofinata, possiamo segnarla con una goccia di inchiostro, una penna, o un piccolo taglio.

**Esperimento 4.3**

Un'altra variazione dell'Esperimento 4.2 è quella di strofinare entrambe le gambe di ogni versorium. Essi vengono poi posti allineati in linea retta con una estremità di ciascuno molto vicino all'altra, quasi a contatto. Dopo il rilascio essi ruotano in direzioni opposte. Quando si fermano, sono paralleli tra loro, fianco a fianco, come in Figura 4.3.

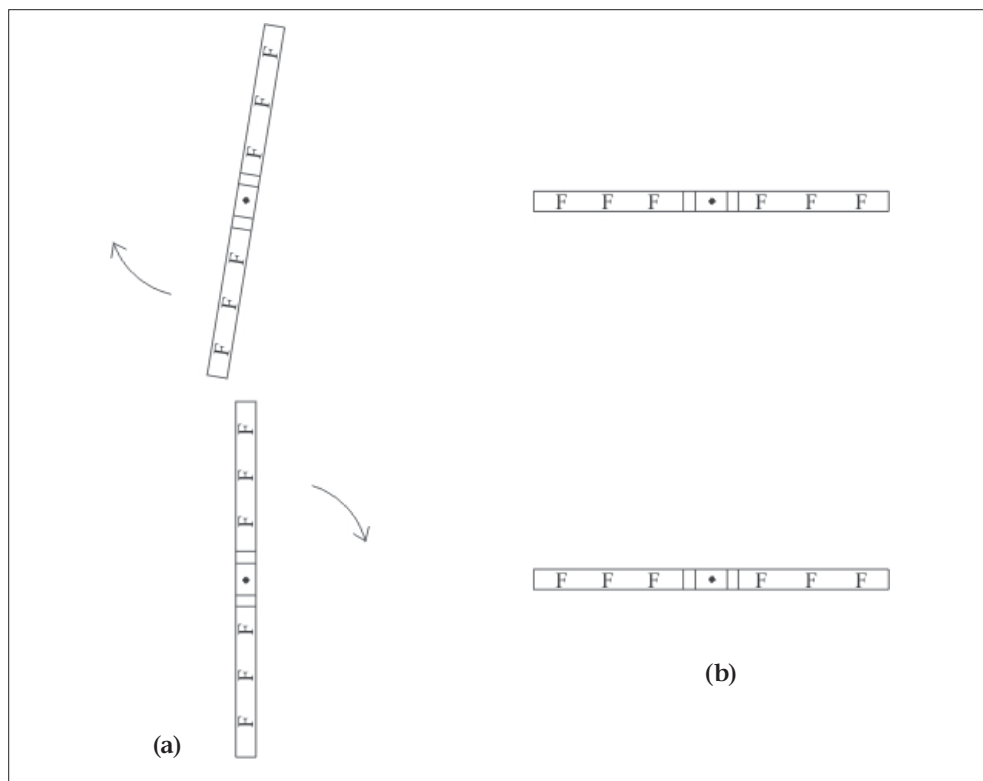



Figura 4.3. **(a)** Repulsione, vista dall'alto, tra due versorium di plastica che sono stati strofinati per tutta la loro lunghezza quando sono collocati l'uno vicino all'altro e allineati nella stessa direzione. **(b)** Gli orientamenti all'equilibrio finale dei due versorium.

## 4.2 Esperimento di Guericke con una piuma fluttuante

**Esperimento 4.4**

Effettuiamo ora un nuovo esperimento, analogo ad uno che ha avuto grande importanza storica. Inizialmente prendiamo un oggetto come una piuma, un seme di dente di leone o un fiocco di ovatta. Il fattore importante è che l'oggetto selezionato debba impiegare molto tempo (in aria) prima di giungere a terra, ad esempio, circa 10 secondi per coprire una distanza di 2 metri di caduta. È anche meglio se cade ancora più lentamente. Al contrario, se la sua caduta è molto veloce, non sarà possibile osservare gli effetti qui descritti.

Iniziamo sfregando sui capelli una cannuccia di plastica. Al fine di determinare se la cannuccia è ben caricata possiamo utilizzare il test del muro descritto nell'Esperimento 3.6. La cannuccia strofinata viene poi disposta orizzontalmente, reggendola con le no-

stre dita da una estremità. Con l'altra mano rilasciamo la piuma, o il seme di dente di leone, o un fiocco d'ovatta un po' al di sopra della cannuccia. L'oggetto viene attratto dalla cannuccia e si attacca ad essa. Se guardiamo da vicino l'oggetto possiamo vedere i suoi filamenti che si stendono, come se volessero allontanarsi dalla cannuccia. Questo si verifica per la stessa ragione per cui gli oggetti utilizzati nell'Esperimento 4.1 si respingono. In realtà, a volte l'oggetto salta verso l'alto dopo il contatto, allontanandosi dalla cannuccia strofinata. Se questo non accade subito, possiamo indurre l'oggetto a staccarsi battendo sulla cannuccia, o soffiando su di esso delicatamente. Dopo che l'oggetto comincia a cadere, possiamo mettere la cannuccia strofinata al di sotto di esso mentre vien giù. L'oggetto, a questo punto, ne viene respinto e si muove verso l'alto. A volte, ciò non accade la prima volta, poiché l'oggetto deve toccare la cannuccia strofinata due o tre volte ed essere liberato dopo ogni contatto prima che possa essere chiaramente respinto da essa. Più elettrizzata è la cannuccia, più rapidamente l'oggetto verrà respinto dopo esserne stato toccato. Da ora supporremo che l'oggetto stia già fluttuando in aria, respinto dalla cannuccia sfregata mentre è posizionata sotto di esso, come in Figura 4.4.

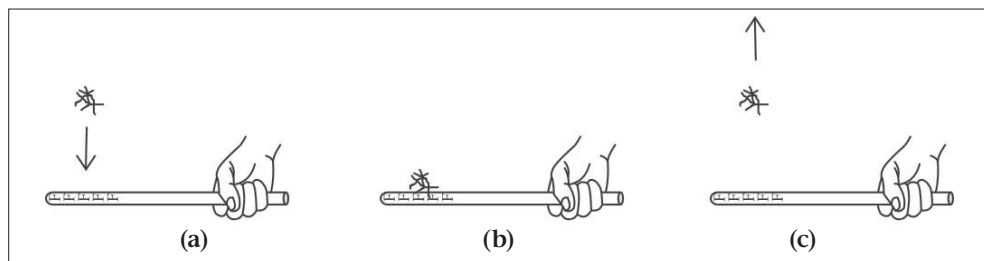



Figura 4.4. **(a)** Un fiocco di ovatta è inizialmente attratto da una cannuccia di plastica strofinata. **(b)** Il cotone tocca la porzione strofinata della cannuccia. **(c)** Dopo il contatto, il cotone viene respinto dalla cannuccia. Esso può quindi essere fatto fluttuare sopra la cannuccia nonostante l'attrazione gravitazionale della Terra!

La Figura 4.5 illustra un esperimento simile realizzato con un seme di dente di leone. Il seme di dente di leone cade molto lentamente per sua natura, quindi è adatto per questo esperimento.

È facile farlo fluttuare sopra una cannuccia di plastica strofinata tra i capelli.

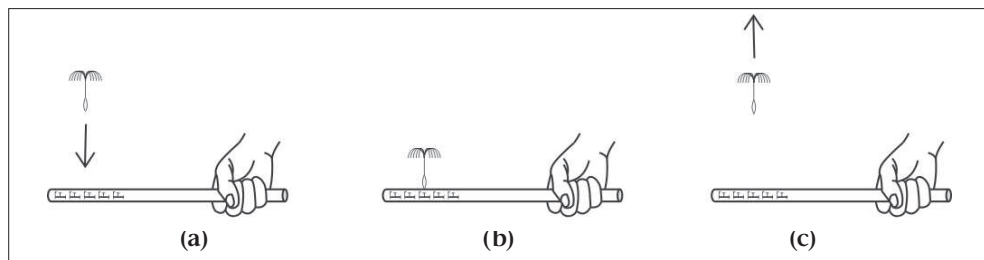



Figura 4.5. L'Esperimento 4.4 può essere facilmente eseguito con un seme del dente di leone che fluttua sopra una cannuccia di plastica strofinata tra i capelli.

Muovendo lentamente la cannuccia strofinata sotto l'oggetto, possiamo spostarlo in qualsiasi luogo all'interno di una stanza. Se l'oggetto si avvicina molto al nostro corpo o ad un qualsiasi altro oggetto della stanza, ne è attratto e si attacca ad esso. Per evitare che ciò accada, utilizziamo la cannuccia strofinata per spingere l'oggetto lontano da questi

Figura 4.6. Otto von Guericke (1602-1686).

corpi. In tal caso l'oggetto può essere fatto volare facilmente per qualche tempo ad una distanza da 10 a 20 cm sopra la cannuccia, a seconda del grado di elettrizzazione di questa. Per mantenere l'oggetto in fluttuazione, la cannuccia strofinata deve essere mantenuta costantemente in movimento sotto di esso, seguendone l'evoluzione, al fine di guidarlo nello spostamento. Con un seme di dente di leone normalmente la procedura è più facile.

Quando esso viene rilasciato in aria sopra la cannuccia strofinata per la prima volta, è attratto dalla cannuccia, la tocca e viene immediatamente respinto da essa. Questo è un esperimento molto semplice, ma estremamente curioso. Nessuno di quelli che lo compiono si dimentica di quello che vede.

Un esperimento simile a questo ha avuto un'enorme importanza storica. Fu eseguito per la prima volta da Otto von Guericke (1602-1686) (Figura 4.6)[1]. Esso fece la sua comparsa nel suo libro *I Nuovi (Cosiddetti) Esperimenti di Magdeburgo*, pubblicato nel 1672, in latino. Secondo la prefazione di questo lavoro, il libro in realtà fu completato nel 1663. Nel corso della sua vita, Guericke fu sindaco di Magdeburgo. Nel libro suddetto egli descrisse la pompa pneumatica da lui inventata applicando la scoperta della capacità dell'aria di essere pompata. Nel 1657 egli la usò per eseguire l'ormai famosa dimostrazione pubblica a Magdeburgo delle enormi forze dovute alla pressione atmosferica[2]. Egli aveva una sfera cava fatta di due emisferi di rame che si toccavano l'un l'altro, fianco a fianco. L'aria all'interno della sfera venne rimossa con la sua pompa. Dopo che ciò fu avvenuto, i due gruppi di otto cavalli che tiravano da ogni lato gli emisferi ebbero enormi difficoltà a separarli. D'altra parte, quando fu consentito all'aria di rientrare nella sfera, si vide che i due emisferi potevano essere facilmente separati da una persona sola.

Ma ciò che ci interessa qui è un altro esperimento eseguito da Guericke. L'illustrazione che lo descrive è presentata in Figura 4.7.

Figura 4.7. L'esperimento in cui Guericke faceva fluttuare una piuma sopra un globo di zolfo strofinato e, a fianco, la sua macchina elettrica.

Citiamo qui dal suo famoso libro[3]:

*L'Esperimento in cui queste virtù importanti, prima citate, possono essere eccitate tramite lo sfregamento di un globo di zolfo*
Se uno ha tali intenzioni, dovrebbe prendere una sfera di vetro, una cosiddetta fiala, delle dimensioni della testa di un bambino e versarci dentro lo zolfo che è stato battuto in un mortaio. Poi, riscaldandola, egli dovrebbe far sciogliere la polvere. Dopo il raffreddamento, dovrebbe rompere la sfera di vetro, estrarre la sfera che ne è rimasta e conservarla in un luogo secco di bassa umidità.
[...]

*Sezione 2.*

Al fine di dimostrare la virtù conservativa presente in questo globo, bisogna fissarlo con un'asta passante attraverso il suo nucleo su due sostegni, *ab*, su un supporto contrassegnato come *abcd*. Questo dovrebbe essere alto un palmo dalla base e dovrebbero essere sparsi sotto di esso vari tipi di pezzettini o parti di foglie, oro, argento, carta, piante di luppolo e altre piccole particelle. Poi si dovrebbe toccare la sfera con una mano asciutta e strofinarla o lisciarla due o tre volte, ecc.. A questo punto essa attrarrà a sé i predetti frammenti. Se il globo viene ruotato sul suo asse, esso trasporterà questi pezzetti con sé. Ora siamo in grado di percepire visivamente come la sfera della nostra Terra tiene e mantiene tutti gli animali e gli altri organismi sulla sua superficie e li trasporta in giro insieme ad essa nel suo moto giornaliero di ventiquattro ore.
[...]

*Sezione 3.*

Si può dimostrare con chiarezza la presenza della virtù espulsiva in questo globo quando viene rimosso dal supporto di cui sopra e mentre è tenuto in mano, viene strofinato o accarezzato nel modo già descritto. Allora non solo attira, ma anche respinge nuovamente da sé i piccoli corpi del tipo di quelli citati prima (a seconda del clima prevalente). Una volta che esso ha toccato questi corpi, non li attira di nuovo fino a che essi non abbiano toccato successivamente altri corpi. Questa virtù può essere vista in modo particolarmente chiaro nel suo effetto su una piuma molto morbida e leggera, *a*, (perché esse cadono sulla Terra più lentamente di altri pezzi e brandelli). Così, quando le piume sono spinte verso l'alto e sono sospese nella sfera d'influenza di questo globo, possono fluttuare per parecchio tempo ed essere trasportate con il globo per l'intera stanza, ovunque si desideri.
[...]

L'Esperimento 4.4 è analogo all'esperimento di Guericke, ma utilizza una cannuccia di plastica invece di un globo di zolfo. Tuttavia, si deve chiarire che lo stesso Guericke non ha considerato come fenomeno intrinsecamente elettrico la repulsione della piuma o, come diceva lui, la "virtù espulsiva" del globo. Per Guericke questa proprietà del globo di zolfo era analoga al potere repulsivo dimostrato dalla Terra in alcune circostanze. Come risultato, è opinione corrente che Guericke né scoprì né riconobbe una vera e propria repulsione elettrica.

L'apparecchio di Guericke viene considerato da alcuni autori come la prima macchina elettrica, vale a dire, la prima attrezzatura con cui gli oggetti potevano essere elettrizzati. Ma Guericke stesso non sarebbe probabilmente d'accordo con questa affermazione. Per Guericke, la palla di zolfo era un simulacro della Terra. Le varie "virtù" mostrate dalla sfera, attrattive e repulsive, avrebbero simulato le virtù analoghe del nostro pianeta. Pertanto, per Guericke queste virtù non erano qualcosa di genuinamente elettrico. Un'analisi dettagliata di questo argomento può essere trovata nelle opere di Roller e Roller, Krafft, e Heilbron[4].

Il primo strumento costruito intenzionalmente per produrre l'elettrizzazione dei corpi è dovuto a Hauksbee (circa 1666-1713) (Figura 4.8)[5]. La manovella e la puleggia fanno

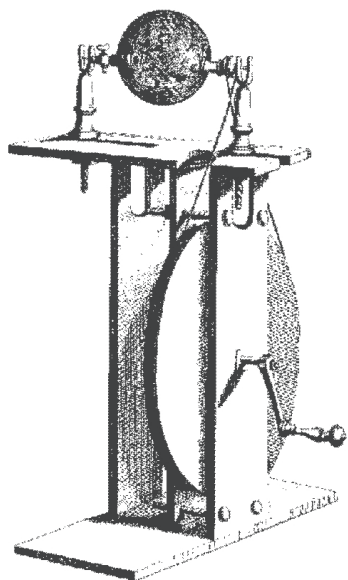



Figura 4.8. Macchina elettrica di Hauksbee.

ruotare la ruota piccola, la quale fa ruotare il globo di vetro. Hauksbee strofinò la superficie esterna del globo rotante con un foglio di carta o con le sue mani nude. Uno strumento come questo è chiamato *macchina elettrica, macchina elettrostatica, generatore triboelettrico* o *generatore elettrico per attrito.*

Esperimenti analoghi a quelli di Guericke sono stati condotti da Gray e da Francis Hauksbee nel 1708. Negli esperimenti di Gray e Hauksbee la piuma era attratta e poi respinta da un vetro flint strofinato, un tipo speciale di vetro contenente piombo nella sua composizione[6]. In seguito vedremo come questo esperimento giocò un ruolo cruciale in una grande scoperta fatta da Du Fay. Il lavoro di Gray del 1708 non fu pubblicato fino al 1954[7]. Gray non cita il libro di Guericke, ma è possibile che conoscesse il suo lavoro, anche se questo non è certo. Hauksbee vide il lavoro originale di Gray ed ebbe un ruolo nell'impedire la sua pubblicazione[8]. Hauksbee pubblicò esperimenti analoghi con piume fluttuanti senza menzionare il nome di Gray.

Nel suo lavoro del 1708 Gray descrisse dodici esperimenti in cui si faceva uso di un tubo di vetro da 70 a 80 cm di lunghezza con un diametro da 2 a 3 cm. Egli strofinò il tubo con le sue mani nude. Qui citiamo solo i quattro esperimenti iniziali[9]:

> Esp. 1°. Lasciando cadere una leggera piuma dalle dita, essa si diresse verso il [tubo strofinato di] vetro ad una distanza di più di 30 pollici [76 cm], alcune delle sue fibre più piccole risposero al moto della mano mentre il vetro veniva strofinato alla distanza di più di 50 pollici [1,3 m]. [Un esempio di questo esperimento appare nelle Figure 4.9 e 4.10.]

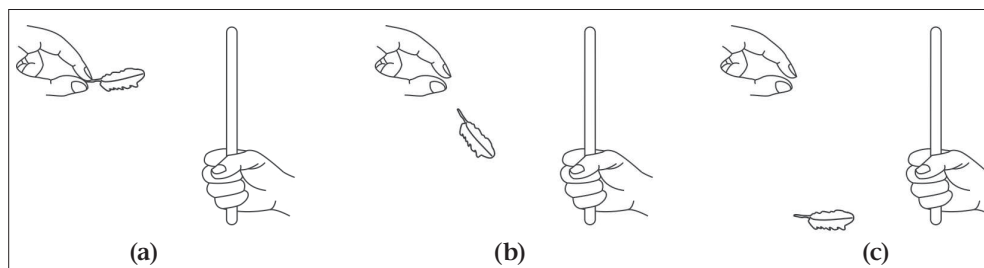



Figura 4.9. Una piuma viene rilasciata in prossimità di un tubo di vetro non sfregato. Essa cade a terra.

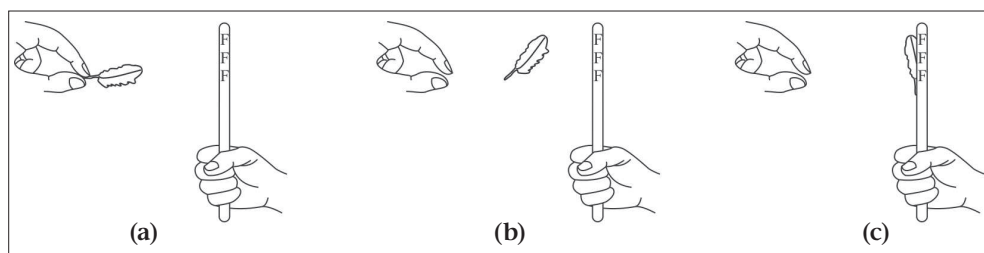



Figura 4.10. L'esperimento di Gray che mostra una piuma attratta da un vetro strofinato.

Esp. 2º. Dopo che la piuma è giunta sul vetro, se la si tiene a circa 6 o 8 pollici [15 o 20 cm] di distanza dallo spigolo di un muro, dal piede di un tavolo o di una sedia, o cose simili, essa sarà attratta da esso e quindi di nuovo dal vetro, e ciò per 10 o 15 volte consecutive incessantemente, mentre essa vola verso un oggetto ad una distanza maggiore, ma meno frequentemente ne fa ritorno [un esempio di questo esperimento appare nella Figura 4.11].

Esp. 3º Quando la piuma è sul vetro e metà delle sue fibre sono stese verso di esso, l'altra metà, divergendo in due coni che si allontanano dal vetro, è molto più ottusa dell'altra; quando la piuma è in questa posizione, se si premono le sue fibre tra il pollice e il dito [indice], esse si ritrarranno appena lasciate e immediatamente si attaccheranno al vetro e, come se avessero conservato una certa sensazione della ferita a loro procurata, difficilmente saranno attratte a salutare ancora una volta le tue dita, ma questo non si verifica sempre allo stesso modo.

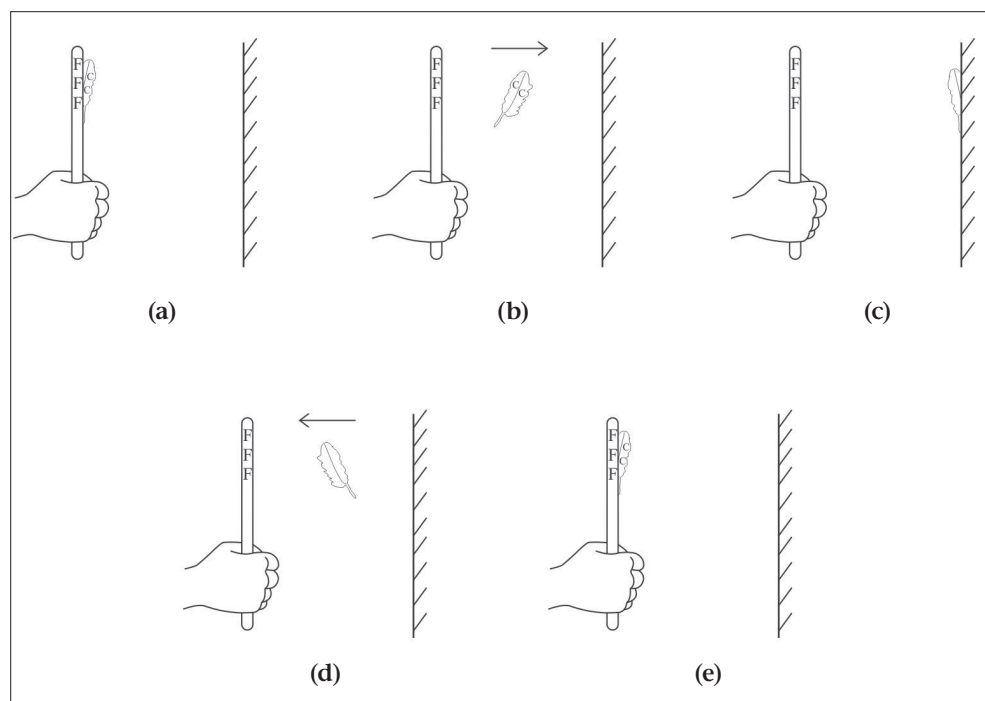



Figura 4.11. L'esperimento di Gray che mostra una piuma che oscilla tra un vetro strofinato ed una parete.

Esp. 4º. Quando la piuma è giunta al vetro e quindi ne viene riflessa, se la si segue con il vetro, fuggirà da esso e sarà impossibile fargliela toccare finché non sarà guidata vicino alla parete più prossima nella stanza o verso qualche altro oggetto solido, da cui sarà attratta e liberamente tornerà al vetro, ripetendo le sue riflessioni come nel secondo esperimento; così qualche volta ho trasportato la piuma per la stanza alla distanza di 5 o 6 pollici [13 o 15 cm] senza toccarla e ho potuto muoverla verso l'alto o verso il basso, spingendola o orizzontalmente lungo una linea o in circolo secondo il movimento del vetro, e se mentre la piuma stava volteggiando nell'aria, avessi strofinato il vetro, la piuma si sarebbe allontanata ulteriormente da esso, ma ancora avrebbe risposto al movimento della mia mano, ad un movimento vibratorio, senza contare quello dell'aria.

## 4.3 Du Fay riconosce la repulsione elettrica come fenomeno reale

Gli esperimenti descritti in queste Sezioni apportano qualcosa di nuovo ed estremamente importante. Finora avevamo solo osservato l'attrazione o l'assenza di attrazione tra un corpo strofinato e i materiali leggeri circostanti. Adesso abbiamo visto che c'è anche la *repulsione* elettrica.

Anche se la repulsione elettrica era stata osservata poche volte da alcuni ricercatori, essa era solitamente vista come un effetto secondario. A volte tale fenomeno era interpretato come una repulsione solo *apparente*. Presentiamo qui alcune spiegazioni alternative. (a) Alcune persone credevano che questo comportamento fosse dovuto ad un flusso d'aria che spingeva i materiali leggeri lontano dai corpi strofinati. (b) Secondo un'altra interpretazione l'*apparente* repulsione era in realtà un'attrazione esercitata da altri corpi circostanti. Secondo questa spiegazione, cioè, non era l'ambra strofinata che iniziava a respingere il materiale leggero, ma in realtà era quest'ultimo ad essere stato attratto da altri corpi circostanti che avevano in qualche modo acquisito un po' di elettricità. In tal caso, il materiale leggero poteva allontanarsi dall'ambra strofinata se l'attrazione dovuta all'ambra fosse risultata più debole di quella imputabile ai corpi circostanti. (c) Un'altra interpretazione data a volte alla repulsione era che essa è come una collisione. Cioè, il corpo sarebbe inizialmente attratto dall'ambra strofinata, colliderebbe con essa e poi rimbalzerebbe lontano. Questo rimbalzo era interpretato meccanicamente, non come una vera e propria repulsione elettrica.

Figura 4.12. Du Fay (1698-1739).

Fu solo con la pubblicazione delle opere di Charles François de Cisternay Du Fay nel 1733 e nel 1734 che la repulsione fu riconosciuta come un fenomeno legittimo e caratteristico delle interazioni elettriche[10]. C'è una bella biografia di Du Fay (Figura 4.12), scritta da Heilbron[11]. Seguendo i lavori iniziali di Gray, Du Fay riuscì a pubblicare alcuni notevoli articoli contenenti scoperte fondamentali sull'elettricità[12].

Qui citiamo le parole di Du Fay che descrivono come concluse che la repulsione elettrica fosse un vero e proprio fenomeno (nostra enfasi in corsivo)[13]. È interessante notare che lo stesso Du Fay non considerava inizialmente la repulsione come un vero e proprio fenomeno e in seguito cambiò idea a causa dell'evidenza sperimentale[14]:

> *Sull'attrazione e repulsione tra corpi elettrici.*
>
> Fino ad oggi abbiamo sempre considerato la virtù elettrica in generale e con questa parola intendiamo non solo la proprietà che i corpi elettrici hanno di attrarre, ma anche la proprietà di respingere i corpi che avevano attirato. Questa repulsione non è sempre costante ed è soggetta a variazioni, cosa che mi ha fatto considerare l'argomento con attenzione e credo di aver scoperto alcuni principi molto semplici che non erano ancora stati supposti e che spiegano tutte queste variazioni, in modo tale che non conosco al momento alcuna esperienza che non sia d'accordo [con questi principi] in un modo molto naturale. Ho osservato che di solito i corpi leggeri sono respinti dal tubo [di vetro strofinato] solo quando ci avviciniamo [a questi corpi leggeri] con qualsiasi [altro] corpo che abbia un volume apprezzabile e questo mi ha fatto pensare che questi ultimi [grandi] corpi erano stati elettrizzati dall'avvicinamento al tubo e che in questo modo [il corpo leggero] fosse sempre attratto, sia dal tubo, che dai [grandi] corpi circostanti, *in modo tale che non ci fosse mai una vera e propria repulsione*.

Tuttavia, un esperimento indicatomi dal Sig. de Reaumur [René Antoine Ferchault de Réaumur, (1683-1757)] si opponeva a questa spiegazione. Esso consiste nel porre polvere da sparo sul bordo di una carta, avvicinare a questa polvere un tubo di cera di Spagna[15] elettrizzata e osservare che esso allontana alcuni granelli al di là della carta. In questo caso non si poteva sospettare che i granelli fossero attratti da un corpo vicino. Un altro esperimento semplice come questo e ancora più sensibile, *mi ha convinto che la mia congettura era falsa*. Dopo aver posizionato delle foglie d'oro su un cristallo, avvicinando il tubo [di vetro strofinato] dal basso, le foglie d'oro sono repulse verso l'alto e non cadono sul cristallo. Certamente non siamo in grado di spiegare questo movimento [ascendente] con l'attrazione di un corpo vicino. La stessa cosa avviene attraverso una garza colorata ed altri corpi che consentono il passaggio del flusso elettrico, in modo tale che non possiamo dubitare che una vera repulsione non esista nell'azione dei corpi elettrici.

### 4.4 Il pendolo elettrico

Per rilevare più chiaramente altri fenomeni elettrici abbiamo bisogno di alcuni strumenti specifici. Costruiremo ora un *pendolo elettrico*, chiamato anche *pendolo elettrostatico*. La procedura più semplice è quella di legare un filo di seta ad un supporto orizzontale, come una cannuccia di plastica. È inoltre possibile utilizzare un sottile filo di poliammide sintetico, come il nylon o il poliestere. *Il punto importante è che questo filo non deve essere di cotone o di lino, come il filo per cucire*. Leghiamo un pezzo di carta o d'alluminio all'estremità inferiore libera del filo. Questo pezzo di carta può essere un disco, un quadrato, un triangolo, ecc., con un diametro o lunghezza massima dell'ordine di 1 o 2 cm. Per il momento la sua forma non sarà rilevante. Il pezzo di carta non deve essere accartocciato o fissato con nastro adesivo. Il nastro adesivo può impedire l'osservazione di alcuni fenomeni che verranno qui descritti. È meglio fare un foro nel pezzetto di carta con uno spillo, fissando il filo tramite esso (Figura 4.13). Di solito l'alluminio funziona meglio della carta normale. Nella Sezione 6.5 illustreremo i componenti fondamentali di un pendolo elettrico come questo, dopo aver effettuato alcuni esperimenti con esso.

Un altro metodo pratico si basa su cannucce di plastica fisse. Inizialmente facciamo un supporto per l'intero sistema. Può essere un pezzo di plastilina attraversato da un chiodo o da un fermaglio per carta. Il chiodo o il fermaglio per carta saranno infilati all'interno della cannuccia, sostenendola in posizione verticale, per cui lo spessore del chiodo e la sua lunghezza devono essere scelti in modo appropriato.

Un supporto molto pratico può essere fatto con sottili tazze di plastica che si usano per il caffè. Facciamo un piccolo foro sul fondo della tazza e spingiamo entrambe le gambe di un fermaglio per carta attraverso di esso. La tazza viene posizionata con il suo fondo verso il basso. Riempiamola di un impasto di gesso bagnato o di cemento bianco bagnato. Lasciamo che asciughi in questa posizione. Sarà usata capovolta, col fermaglio di carta che punta verso l'alto (Figura 4.14). Poiché questo tipo di supporto sarà utilizzato anche in altri strumenti elettrici, è utile prepararne molti in una sola volta. Alcuni esperimenti potrebbero richiedere fino a 10 basi d'appoggio.

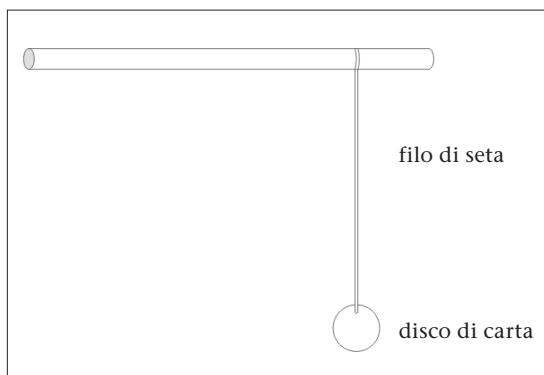



Figura 4.13. Un modo semplice per fare un pendolo elettrico.

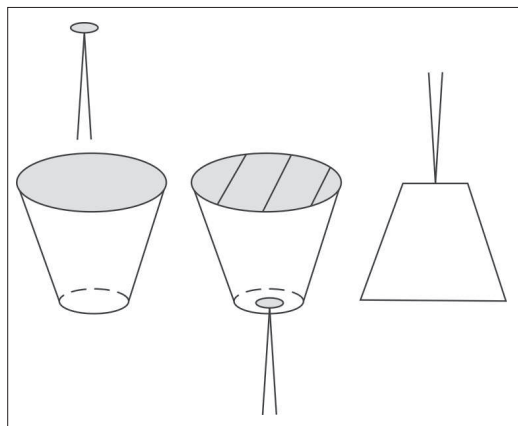



Figura 4.14. Supporto per il pendolo elettrico costituito da una tazza da caffè di plastica sottile, un fermaglio per carta e pasta di gesso.

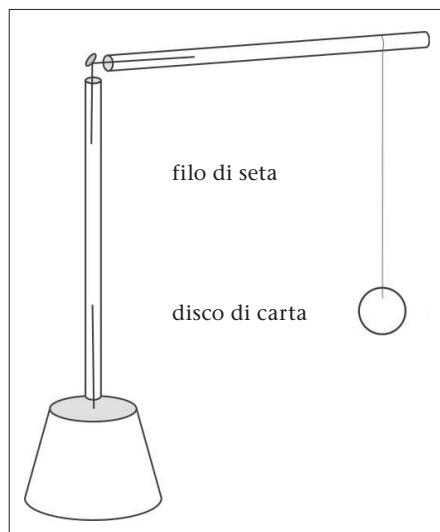



Figura 4.15. Pendolo elettrico con supporto.

Dopo questa procedura, poniamo sul supporto una cannuccia a forma di lettera L ribaltata. Un'alternativa è quella di utilizzare due cannucce, una fissata verticalmente sul supporto e l'altra in orizzontale. La seconda cannuccia è attaccata alla prima con un secondo fermaglio. Le gambe di questo secondo fermaglio hanno un angolo di 90°, con una gamba verticale e l'altra orizzontale.

All'estremità libera della cannuccia orizzontale leghiamo il filo di seta con il disco di carta collegato alla sua estremità inferiore. Questo completa il pendolo elettrico (Figura 4.15).

## Esperimento 4.5

Prepariamo un pendolo elettrico con un disco di carta alla sua estremità. Aspettiamo fino a quando il pendolo è in quiete, con il filo di seta e il disco di carta appeso verticalmente verso il basso. Prendiamo ora una cannuccia neutra, cioè una cannuccia che non attrae pezzi leggeri di carta su un tavolo, come nell'Esperimento 2.1 (Figura 2.1). Portiamo questa cannuccia di plastica neutra vicino al disco di carta del pendolo elettrico. Non accade nulla. Il pendolo rimane fermo in direzione verticale.

Strofiniamo un'altra cannuccia in un foglio di carta, tra i capelli o in un tessuto. La cannuccia strofinata viene lentamente portata vicino al pendolo. Osserviamo che il disco di carta inizia a muoversi verso la porzione strofinata della cannuccia. Per il momento

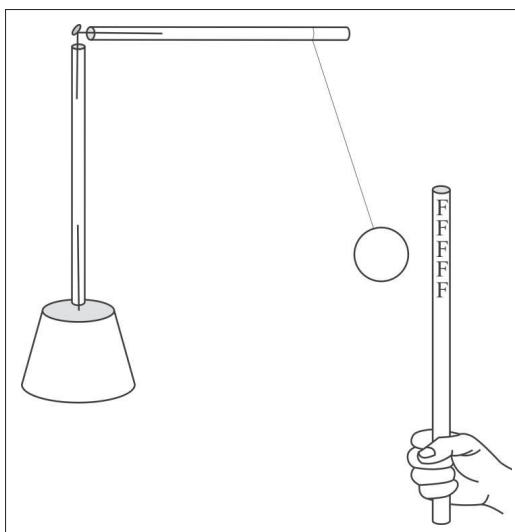



Figura 4.16. Una plastica strofinata attrae il disco di carta di un vicino pendolo elettrico.

non li metteremo in contatto. In questa situazione il filo di seta del pendolo rimane inclinato rispetto alla verticale, con il disco di carta vicino alla sezione strofinata della cannuccia di plastica (Figura 4.16).

Questo esperimento è analogo all'Esperimento 2.1, e dimostra un'attrazione tra la cannuccia strofinata e il pendolo. Ora abbiamo un terzo criterio per dire che un corpo è *elettricamente neutro*. Il primo criterio è stato presentato nell'Esperimento 2.1, cioè, il corpo non deve attrarre corpi leggeri verso l'alto. Il secondo criterio è quello dell'Esperimento 3.1: il corpo non deve orientare un versorium metallico. Il terzo criterio è quello qui illustrato: non cambia l'angolo verticale del filo di un vicino pendolo elettrico. Un *corpo carico*, invece, attrae corpi leggeri verso l'alto, orienta i versorium, e cambia l'angolo del filo di un pendolo elettrico.

### Esperimento 4.6

Possiamo far sì che il disco di carta segua il movimento della plastica strofinata spostando questa lentamente avanti e indietro di fronte al pendolo. Per il momento essi non devono essere portati molto vicini l'uno all'altro, in modo da evitare il contatto. In questo caso, quando la plastica si sposta verso il pendolo, il disco di carta si avvicina alla plastica, e quando la plastica si allontana dal pendolo, il disco di carta torna alla direzione verticale originale (Figura 4.17).

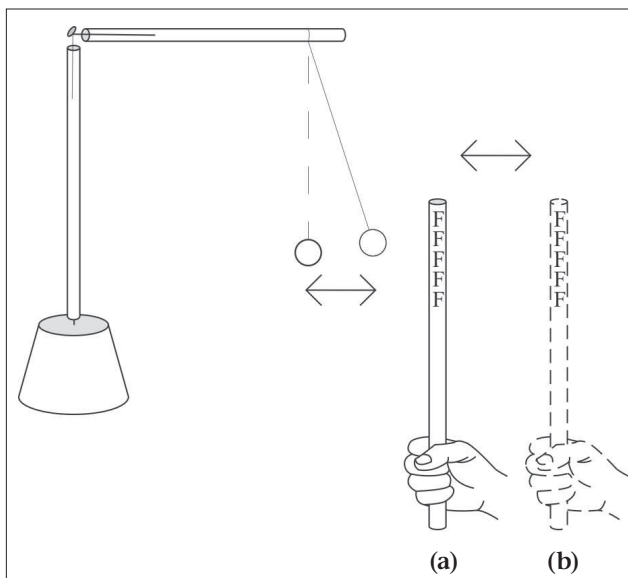



Figura 4.17. Un pendolo elettrico segue il moto di un pezzo di plastica strofinato. **(a)** Quando la cannuccia è portata vicino al disco di carta, la carta si muove verso di essa. **(b)** Quando la cannuccia viene allontanata, il pendolo ritorna alla direzione verticale.

### Esperimento 4.7

Ripetiamo l'Esperimento 4.5. Ma ora portiamo la plastica strofinata più vicina al disco di carta, permettendo loro di entrare in contatto. Osserviamo che il pendolo è inizialmente attratto e subito dopo viene respinto dalla plastica strofinata! Fra l'attrazione e la repulsione, qualcosa di fondamentale accade: il *contatto* tra il disco di carta e la plastica strofinata. Dopo questo contatto, la carta vola via dalla cannuccia strofinata ogni volta che cerchiamo di avvicinarle (Figura 4.18).

A volte il disco di carta non viene immediatamente respinto dalla plastica strofinata dopo il contatto, rimanendo attaccato ad essa per alcuni secondi. In questi casi si può ottenere la repulsione voluta picchiettando sulla cannuccia affinché rilasci il disco. A tal fine potremmo anche muovere la cannuccia su e giù o soffiare leggermente. Dopo aver interrotto il contatto, la carta è normalmente respinta dalla plastica strofinata. In alcuni casi, prima di poter osservare la loro repulsione, sono necessarie 2 o 3 attrazioni del disco da parte della cannuccia strofinata, sempre dopo essere venute in contatto in ogni attrazione.

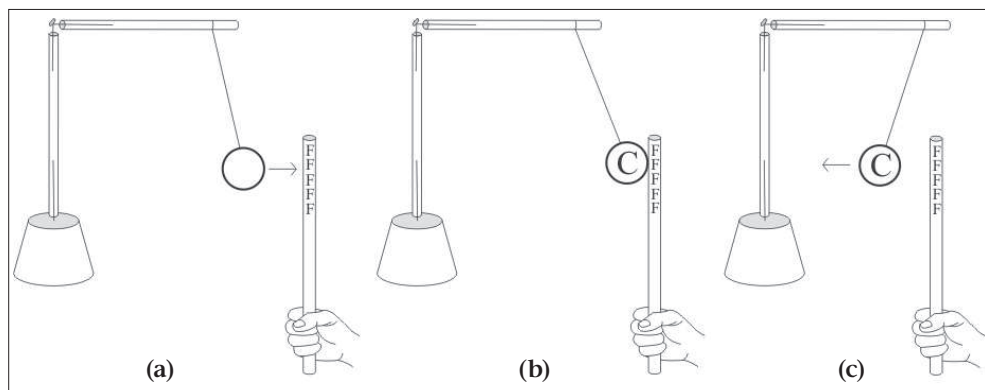



Figura 4.18. **(a)** Il disco di carta è inizialmente attratto dalla plastica strofinata, **(b)** la tocca e poi **(c)** è respinto dalla cannuccia. La lettera C significa contatto.

Questa repulsione dopo il contatto con un corpo strofinato potrebbe essersi verificata per alcuni oggetti negli Esperimenti 2.1, 2.3, e 2.4. Ma in questi esperimenti gli oggetti leggeri, quando non più in contatto con la plastica strofinata, cadevano a terra a causa dell'attrazione gravitazionale della Terra. E non è facile distinguere questa attrazione verso la Terra da una possibile repulsione esercitata su di loro dalla plastica strofinata che è stata posta sopra di loro. Il vantaggio del pendolo elettrico è che il filo di seta bilancia l'attrazione gravitazionale esercitata dalla Terra sul disco di carta. Quando il disco viene respinto dalla cannuccia strofinata dopo il contatto, esso non cadrà a terra, perché viene sorretto dal filo di seta. È quindi facile vedere la repulsione tra la plastica strofinata e il disco di carta dopo il loro contatto.

In ogni caso, eseguendo gli Esperimenti 2.1, 2.3 e 2.4 ancora una volta, possiamo percepire la repulsione elettrica dopo il contatto agire insieme all'attrazione gravitazionale, a patto che analizziamo con attenzione tutti i dettagli di questi esperimenti.

## Esperimento 4.8

Ora ripetiamo l'Esperimento 4.7. Inizialmente il pendolo viene attratto dalla plastica strofinata, la tocca, e comincia ad essere respinto dopo il rilascio. Rimuoviamo poi la plastica strofinata e il disco ritorna alla posizione verticale. Ora avviciniamo al disco di carta uno spiedino neutro di legno (o un foglio di carta, o il nostro dito). Questo movimento di accostamento deve essere molto lento, per evitare il contatto. Ciò che si osserva è che il filo si inclina verso lo spiedino, indicando che il disco di carta viene attratto da quest'ultimo (Figura 4.19).

Figura 4.19. Il pendolo elettrico che veniva respinto da una cannuccia strofinata dopo che i due erano stati messi a contatto, è ora attratto da uno spiedino di legno neutro.

Come abbiamo visto nella sezione 3.5, nell'Esperimento 4.7 questa attrazione indica che il pendolo è diventato elettricamente carico. Avevamo utilizzato la lettera F quando

una plastica neutra era stata elettrizzata per *strofinio*. Ora osserviamo che un disco di carta diventa carico al solo *contatto* con un pezzo di plastica strofinato. Questo processo di carica sarà indicato dalla lettera C. Questo è il significato della lettera riportata nelle Figure 4.19 e 4.18.

**Definizioni:** Diciamo che nell'Esperimento 4.7 il disco di carta del pendolo *ha acquisito una carica elettrica a causa del contatto con un altro corpo carico*, è diventato *carico per contatto* o *elettrizzato per contatto*. Il processo è chiamato *carica per contatto*, *trasferimento di carica per contatto* o *elettrizzazione per contatto*.

Invece della parola *contatto*, a volte si usa un termine più generale. Per esempio, *elettrizzazione per comunicazione* o *elettrizzazione per trasferimento di cariche*. C'è una ragione per questo. Il contatto fisico tra la plastica strofinata e il disco di carta non è sempre necessario per elettrizzare il disco di carta. A volte c'è una scarica elettrica (per esempio, una scintilla) attraverso l'aria quando la plastica sfregata e il disco di carta sono molto vicini l'uno all'altro. Quando questo accade, vi è un trasferimento di carica tra la plastica strofinata e il disco di carta. In questo caso il disco di carta, inizialmente scarico, acquisisce una carica elettrica e comincia ad essere respinto dalla plastica strofinata. In questo libro non ci occuperemo di questi fenomeni di scariche elettriche attraverso l'aria.

### 4.5 Scarica tramite messa a terra

**Esperimento 4.9**

Per ripetere l'Esperimento 4.8 con lo stesso pendolo, dobbiamo prima toccare il disco di carta con il nostro dito. Non è necessario prenderlo in mano; un tocco è sufficiente. Dopo di ciò, quando portiamo un altro dito (o un foglio di carta, o uno spiedino di legno) vicino al disco di carta, si osserva che il disco di carta non si sposta, dal momento che il filo rimane in verticale. Il disco di carta non è più attratto dallo spiedino, dal dito, o da un foglio di carta neutri, come è avvenuto nell'Esperimento 4.8. Vedere la Figura 4.20.

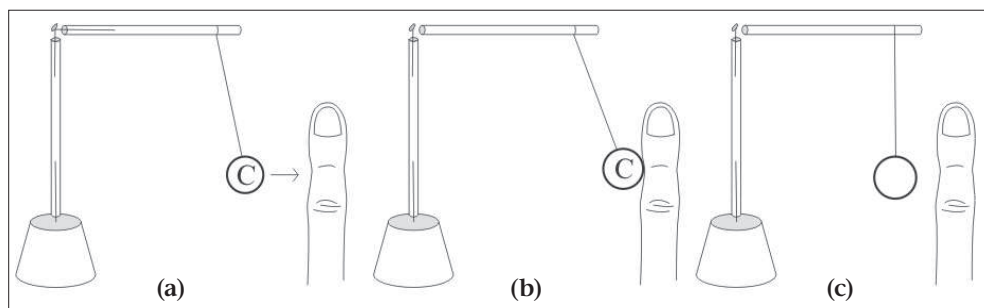



Figura 4.20. **(a)** Un pendolo elettrico caricato viene attratto da un dito. **(b)** Se si toccano l'un l'altro, il pendolo si scarica. **(c)** Dopo essere stato scaricato, il pendolo non è attratto da un dito vicino.

**Definizioni:** diciamo che il disco di carta *ha perso la sua carica elettrica per contatto* con il dito, o che è *stato scaricato dal contatto*, *scaricato elettricamente* o, semplicemente, *scaricato*. Il processo è chiamato *scarica per contatto*, *tramite messa a terra*, o *tramite messa a massa*. È chiamato anche *messa a terra elettrica*, *messa a massa elettrica*, *mettere a terra*, o *mettere a massa*. L'origine di questi nomi è che il corpo carico viene scaricato dal corpo umano, che è normalmente in contatto elettrico con il suolo.

Dopo la scarica, quando portiamo una plastica strofinata nei pressi del pendolo, essa non è più respinta, come è avvenuto alla fine dell'Esperimento 4.7. Ciò che si osserva adesso è lo stesso comportamento che si è descritto all'inizio dell'Esperimento 4.7. Cioè, il pendolo è inizialmente attratto dalla plastica strofinata, la tocca, e solo allora viene nuovamente respinto da essa.

Ogni volta che si tocca il disco di carta con il nostro dito, possiamo ripetere l'intera procedura di nuovo. Cioè, il pendolo ritorna alla sua posizione neutra iniziale.

Chiamiamo la plastica strofinata degli Esperimenti 4.7 e 4.9 corpo A. Il disco di carta sarà chiamato corpo B. E la mano che tocca il disco sarà chiamata corpo C. Fu nel 1729 che Gray scoprì che un corpo B, elettrizzato dal contatto con un oggetto strofinato A, viene scaricato dal contatto con la mano C. Una delle sue descrizioni dell'effetto di messa a terra appare nella sua opera del 1731. Egli caricò un lungo tubo di vetro per strofinio. Il tubo fu utilizzato per elettrizzare un altro corpo per contatto. Citiamo alcune delle sue parole qui (nostra enfasi in corsivo)[16]:

> [...] Perché da diversi esperimenti risulta che se un corpo [C] *tocca* quello [corpo B elettrizzato dal contatto con un corpo A] che esso attira, la sua attrazione cessa fino a quando quel corpo [C, che ha toccato il corpo B elettrizzato] viene rimosso, e l'altro [corpo B, che era inizialmente elettrizzato e che era stato scaricato dal contatto con il corpo C] è nuovamente eccitato dal tubo [di vetro strofinato A].

Nel 1733 Du Fay cominciò ad utilizzare questa procedura in modo sistematico. Strofinò un tubo di vetro e lo utilizzò per elettrizzare una sfera di legno[17,18]:

> Inoltre, fui attento a toccare la sfera [elettrizzata] con la mano dopo ogni esperimento che avevamo fatto con il tubo [cioè, dopo ogni elettrizzazione della palla utilizzando il tubo di vetro strofinato], al fine di rimuovere [dalla palla] tutta la virtù [elettrica], che avrebbe potuto avere acquisito dall'avvicinamento del tubo [di vetro strofinato]; in effetti, questa [procedura] rimuoveva tutta la sua elettricità, come menzionato da Mr. Gray; [...]

**Esperimento 4.10**

Eseguiremo ora questi esperimenti in modo più dettagliato per vederne tutti gli effetti. Inizialmente portiamo il nostro dito vicino al disco di carta non caricato di un pendolo elettrico. Il disco non si muove. Strofiniamo una cannuccia e portiamola vicino al disco. Il disco è attratto, tocca la cannuccia e comincia ad essere respinto da essa, come nella Figura 4.18. Togliamo la cannuccia e il filo del pendolo ritorna alla posizione verticale.

A questo punto muoviamo lentamente il dito vicino al disco, ma senza toccarlo. Il disco è attratto dal dito, muovendosi verso di esso.

Se il disco tocca il dito, il pendolo ritorna immediatamente alla posizione verticale. Quando portiamo di nuovo il dito vicino al disco, esso non si muove, in quanto non è più attratto dal dito. Il pendolo è ritornato nella sua situazione originaria.

Possiamo strofinare di nuovo la cannuccia e iniziare tutta questa serie di esperimenti daccapo.

## 4.6 Il pendolo elettrico di Gray

La descrizione più antica che conosciamo di un pendolo elettrico è stata data da Gray nel 1720. Egli eseguì un esperimento analogo all'Esperimento 4.5, ma utilizzando una piuma al posto di un disco di carta[19]:

Una piuma era stata legata alla fine di un sottile filo di seta grezza e l'altra estremità ad un bastoncino, che era stato fissato ad un appoggio, in modo che potesse stare in verticale sul tavolo: era stato preso un pezzo di carta marrone, che attraverso il suddetto metodo [cioè, la carta era inizialmente riscaldata dal fuoco e poi strofinata facendola passare tra le sue dita] è stato reso fortemente elettrico, tanto che essendo tenuto nei pressi della piuma, l'ha fatta avvicinare alla carta, e io ho potuto portarla con lo stesso fino a metterla quasi in perpendicolare rispetto al bastoncino; poi alzando la mia mano finché la carta non si trovasse al di là della piuma, il filo si è steso e stava diritto in aria, come se fosse stato un pezzo di cavo, sebbene la piuma fosse distante dalla carta circa un pollice [2,54 centimetri].

Illustriamo questo esperimento nella Figura 4.21.

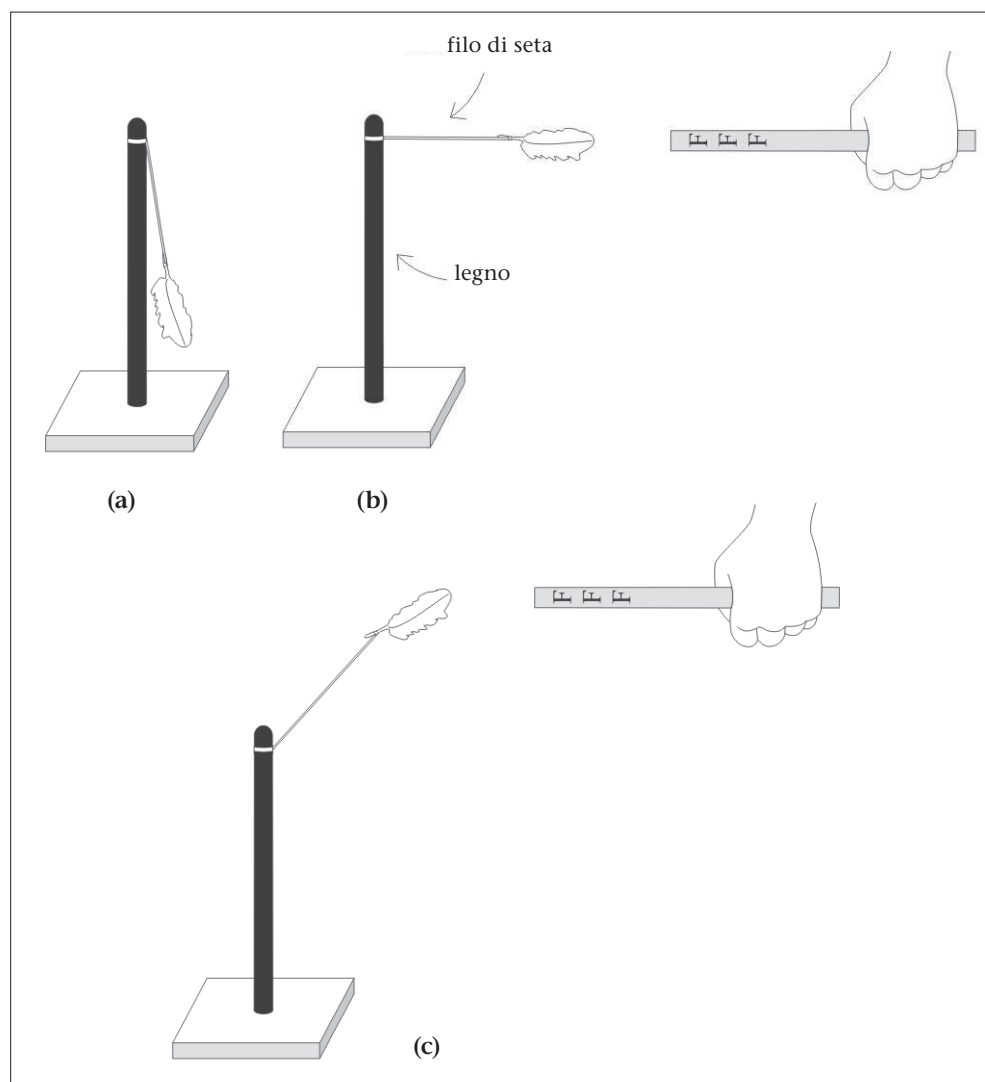
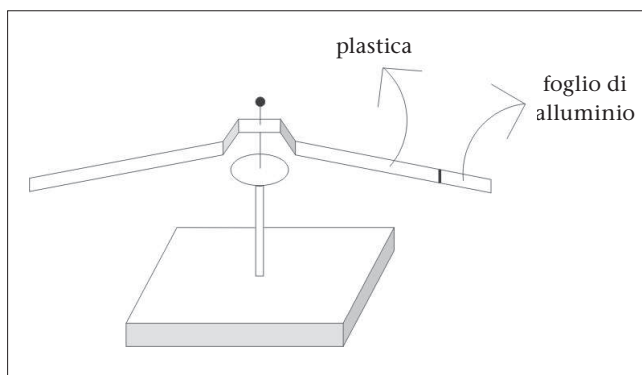



Figura 4.21. Il pendolo elettrico di Gray.

## 4.7 Il versorium di Du Fay

Un altro modo interessante per osservare la repulsione elettrica si basa su un versorium creato da Du Fay[20]. Nel suo caso si trattava di un versorium di vetro con una sfera metallica cava al termine di una delle sue gambe. Qui usiamo un versorium di plastica analogo, come descritto nella Sezione 3.1, cioè una striscia di plastica a forma di cappello, con le sue due gambe che puntano leggermente verso il basso. C'è uno spillo fissato al centro della plastica, con la punta verso il basso e appoggiato sulla testa di un chiodo conficcato in una tavola. Ciò che caratterizza il versorium di Du Fay è che noi avvolgiamo una sua estremità con un piccolo ritaglio di alluminio per alimenti. Ci sono due possibilità per bilanciare il versorium se inizia a cadere da questo lato a causa del suo peso addizionale. Il primo è quello di incollare della plastica all'altra parte. La seconda possibilità è quella di rimuovere una piccola sezione della gamba dove l'alluminio viene attaccato, prima di fare l'esperimento. Il punto importante è che il versorium deve essere equilibrato in orizzontale, con una delle sue estremità avvolta nell'alluminio (Figura 4.22).

Figura 4.22. Il versorium di Du Fay è fatto di plastica, con la punta di una delle sue gambe avvolta da un piccolo ritaglio di alluminio per alimenti.

Al fine di effettuare esperimenti con questo versorium, è importante assicurarsi che esso sia inizialmente neutro. Questo è l'aspetto più delicato, principalmente a causa della plastica. Per ottenere la neutralità di carica tocchiamo l'alluminio con il nostro dito per scaricarlo. Poniamo poi il nostro dito vicino a diverse parti del versorium di plastica, senza toccarle. Se il versorium rimane a riposo, senza essere orientato dal nostro dito, diciamo che esso è elettricamente neutro. Quando reagisce al dito che viene portato vicino, diciamo che esso è carico. A volte si può inavvertitamente caricarlo per attrito con la nostra mano, mentre lo stiamo costruendo o mentre stiamo avvolgendo l'alluminio intorno ad una sua estremità. Se questo accade, attendiamo qualche minuto in modo che si scarichi in modo naturale. In alternativa, lo puliamo con un tovagliolo di carta bagnato e attendiamo che si asciughi. Anche dopo queste procedure bisogna sempre controllare se esso sia davvero neutro. D'ora in poi assumeremo che il versorium sia neutro prima di iniziare i seguenti esperimenti.

**Esperimento 4.11**

Strofiniamo una cannuccia di plastica e avviciniamola lentamente al foglio di alluminio del versorium di Du Fay, non permettendo che vengano a contatto. Osserviamo che il versorium gira attorno al suo asse verticale, fermandosi con la lamina di alluminio rivolta verso la plastica strofinata (Figura 4.23). Quando muoviamo la cannuccia, il versorium la seguirà. Quanto descritto è analogo all'Esperimento 3.1.

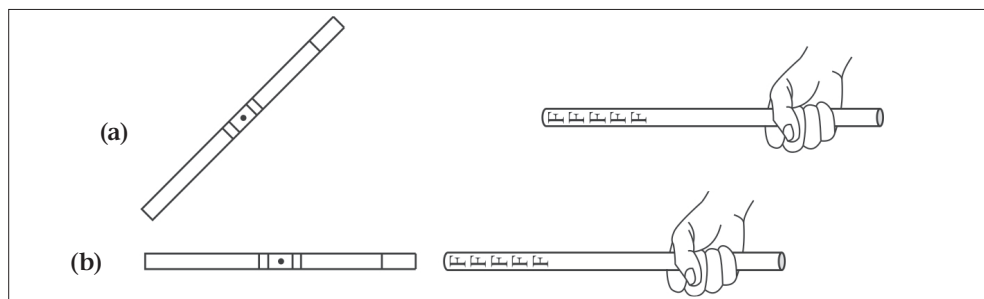



Figura 4.23. Foglio di alluminio del versorium di Du Fay che viene attratto da una plastica strofinata avvicinata ad esso.

## Esperimento 4.12

Ripetiamo l'Esperimento 4.11. Ma ora avviciniamo la cannuccia strofinata all'alluminio, permettendo loro di venire in contatto. Osserviamo che esso è prima attratto dalla cannuccia, ma ne viene poi respinto e, infine, volge la punta lontano dalla cannuccia (Figura 4.24). Tra questa attrazione e repulsione accade qualcosa di cruciale: il *contatto* tra l'alluminio e la plastica strofinata.

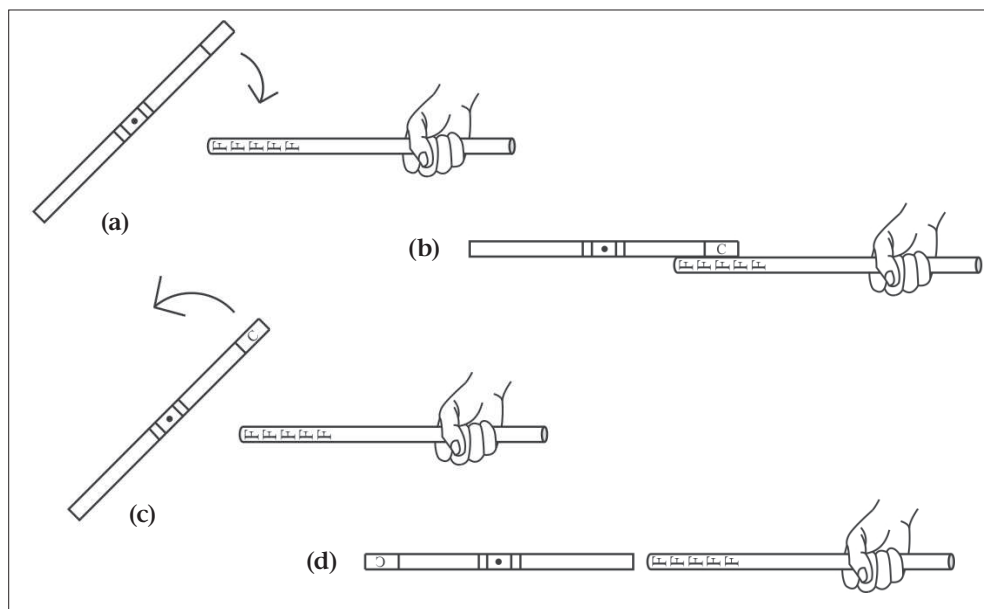



Figura 4.24. **(a)** L'alluminio è inizialmente attratto dalla plastica strofinata. **(b)** L'alluminio tocca la porzione strofinata della cannuccia. **(c)** Dopo il contatto, l'alluminio viene respinto dalla cannuccia. **(d)** Orientamento del versorium all'equilibrio finale.

A volte l'alluminio non viene immediatamente respinto dopo il contatto, ma resta attaccato alla cannuccia. Se questo accade, sarà necessario liberarlo in modo da vedere la repulsione che ne segue. Ciò può essere ottenuto picchiettando sulla cannuccia, o muovendola su e giù insieme all'alluminio. Normalmente, durante questa procedura, essi si staccheranno l'uno dall'altro. Dopo il rilascio, l'alluminio inizierà ad essere respinto dalla cannuccia strofinata, allontanandosi da essa.

**Esperimento 4.13**

Ripetiamo l'Esperimento 4.12. Alla fine dell'esperimento mettiamo via la cannuccia strofinata. Avviciniamo poi lentamente il dito (o un foglio di carta o uno spiedino di legno) all'alluminio, senza permettere loro di toccarsi. Osserviamo che l'alluminio è attratto dal dito, punta verso di esso e segue il suo movimento (Figura 4.25)!

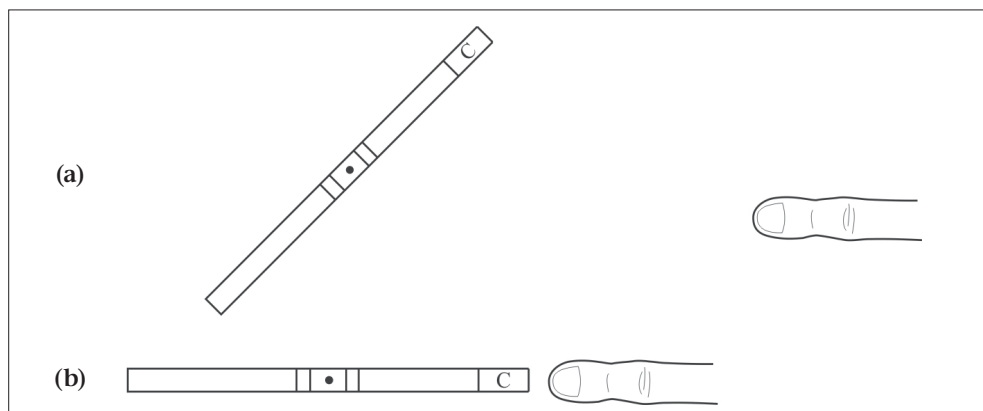



Figura 4.25. L'alluminio, che in precedenza aveva toccato un pezzo di plastica strofinato, è ora attratto da un dito posto vicino ad esso.

Come abbiamo visto nella sezione 3.5, questo esperimento indica che il foglio di alluminio del versorium di Du Fay è diventato carico quando ha toccato la plastica strofinata.

C'è una cosa da tenere in mente a questo punto. Questo esperimento e molti altri descritti in questo libro possono non funzionare perfettamente se ha piovuto di recente o se l'aria è umida. L'umidità dell'aria rende difficile alle cariche elettriche di accumularsi e diminuisce quindi la dimensione degli effetti che devono essere osservati. Gli esperimenti di elettrostatica di solito funzionano bene in ambienti asciutti.

**Esperimento 4.14**

Per ripetere tutta questa serie di esperimenti con lo stesso versorium di Du Fay, dobbiamo inizialmente toccare l'alluminio con il nostro dito. Dopodiché, osserveremo che il versorium non reagisce più e rimane a riposo quando ad esso avviciniamo di nuovo un dito o un foglio di carta. Esso non è più attratto dal dito, come succedeva prima nell'Esperimento 4.13.

Quando portiamo di nuovo la cannuccia strofinata vicino all'alluminio, osserviamo lo stesso comportamento di prima, vale a dire, l'attrazione, il contatto, e la repulsione.

Ogni volta che tocchiamo il foglio di alluminio con il nostro dito, possiamo iniziare l'intera procedura daccapo, poiché il versorium ritorna nella sua condizione iniziale.

## 4.8 Il Meccanismo ACR

Nel 1733 Du Fay fu il primo a rendersi conto del meccanismo fondamentale di attrazione, contatto (o comunicazione di elettricità attraverso un approccio a corta distanza), e repulsione descritto nell'Esperimento 4.10. Heilbron definì ACR questa semplice regola di attrazione, comunicazione di elettricità, e repulsione (cioè, attrarre, comunicare, repellere)[21]. Questa regolarità fu correttamente considerata da Du Fay come grande scoperta. Dopotutto, questo principio spiega una vasta gamma di fenomeni elettrici.

Du Fay aveva eseguito alcuni esperimenti in precedenza e osservato il comportamento che permetteva di classificare o distinguere diversi materiali. Quando egli strofinava un corpo e lo portava nei pressi di oggetti leggeri, osservava che alcuni di questi subivano un'attrazione più forte di altri dello stesso peso. Egli notò che quelli più facilmente attratti corrispondevano esattamente ai materiali che acquisivano una carica più piccola per strofinio.

Un esempio di questo comportamento è stato osservato nelle sezioni 2.4 e 2.7. I piccoli pezzi di plastica o seta, per esempio, sono molto meno attratti da una plastica strofinata rispetto ai piccoli pezzi di metallo o di carta. D'altra parte, possiamo elettrizzare per attrito plastica e seta più facilmente rispetto alla carta o al metallo.

Al tempo di Du Fay, i corpi che avevano la proprietà di attrarre materiali leggeri se strofinati erano comunemente chiamati *elettrici*. Un corpo elettrico era considerato buono o cattivo in base alla forza maggiore o minore con cui attraeva corpi leggeri dopo essere stato strofinato. Dopo questa introduzione, possiamo citare le parole di Du Fay che descrivono il principio ACR[22,23]:

> Quindi, avendo riflettuto sul fatto che i corpi di per sé meno elettrici fossero più vigorosamente attratti [da corpi elettrizzati] rispetto ad altri [corpi che sono più facilmente elettrizzati per strofinio], ho immaginato che forse i corpi elettrici attirerebbero tutti i corpi che non lo sono [elettrici, cioè egli immaginò che i corpi che sono elettrizzati per strofinio attirerebbero tutti i corpi che non siamo in grado di elettrizzare con lo stesso metodo], e respingerebbero tutti i corpi che lo diventano [elettrizzati] a causa del loro avvicinamento [cioè per l'avvicinamento o per il contatto con un corpo elettrizzato] e grazie alla comunicazione della virtù [elettrica].
> [...]

Du Fay continua e descrive gli esperimenti che compì e che erano analoghi agli esperimenti di Guericke, Gray, e Hauksbee (vedi l'Esperimento 4.4). Cioè, fu capace di far svolazzare in aria un pezzo di fogliolina d'oro che era stato rilasciato sopra un tubo di vetro strofinato. La foglia fu prima attratta dal tubo, poi toccata, ed infine respinta, cominciando a volteggiare sopra di esso. Egli continuò a scrivere (la nostra enfasi in corsivo)[24,25]:

> La spiegazione di tutti questi fatti è molto semplice, supponendo il *principio* che ho appena citato; perché, nel primo esperimento, quando la foglia [d'oro] viene rilasciata sul tubo [di vetro strofinato], esso attira fortemente questa foglia che non è affatto elettrica, ma dopo che essa ha toccato il tubo o che si è semplicemente avvicinata al tubo, essa ne viene respinta, e ne è sempre tenuta lontano, finché il piccolo vortice elettrico che esso aveva acquisito non si sia esaurito o almeno notevolmente ridotto; allora, non essendo più respinta, cade nuovamente sul tubo, dove acquisisce un nuovo vortice [una nuova carica elettrica] e, di conseguenza, nuove forze per fuggire dal tubo, [e questo processo] continua finché il tubo mantiene la sua virtù [elettrica].

Ecco un'altra descrizione di questo *principio*[26]:

> Nell'effettuare l'esperimento riferito da Otho de Guerik, nella sua collezione di esperimenti *de Spatio Vacuo* [1672], che consiste nell'usare una palla di zolfo resa elettrica per respingere una piuma, mi sono reso conto che gli stessi effetti erano prodotti non solo dal tubo [strofinato], ma dai corpi elettrici di qualsiasi tipo; e ho scoperto un principio molto semplice, che spiega una gran parte delle irregolarità e se posso usare questo termine, dei capricci che sembrano accompagnare la maggior parte degli esperimenti sull'elettricità. Questo principio è che i corpi elettrici attraggono tutti coloro che non lo sono e li respingono non appena essi sono diventati elettrici, a causa

della vicinanza o del contatto del corpo elettrico. Così la foglia d'oro viene dapprima attratta dal tubo [di vetro strofinato]; e acquisisce un'elettricità avvicinandosi ad esso; e di conseguenza è subito respinta da esso. Né è nuovamente attratta, finché conserva la sua qualità elettrica. Ma se, mentre è così sostenuta in aria, le capita d'imbattersi in qualche altro corpo, essa perde subito la sua elettricità; e conseguentemente è nuovamente attratta dal tubo, che, dopo averle dato una nuova elettricità, la respinge una seconda volta; il che si ripete finché il tubo mantiene la sua elettricità. Applicando questo principio ai vari esperimenti di elettricità, si rimane sorpresi dal numero di fatti oscuri ed enigmatici che esso chiarisce.

### Esperimento 4.15

Possiamo fare oscillare il pendolo elettrico eseguendo un curioso esperimento. Poniamo la mano sinistra con quattro dita vicino al disco di carta, senza toccarlo. La mano rimarrà sempre in questa posizione durante tutto l'esperimento. Strofiniamo una cannuccia di plastica e portiamola lentamente vicino al disco di carta. Dopo che il disco la tocca, la cannuccia deve rimanere in quella posizione.

Osserviamo che il pendolo è inizialmente attratto dalla plastica strofinata, la tocca, viene respinto da essa, si muove verso la mano, la tocca, ed è di nuovo attratto dalla cannuccia. L'intero processo si ripete per alcune veloci oscillazioni della carta, che tocca alternativamente la plastica strofinata e la mano dall'altra parte. Possiamo aumentare il numero di queste oscillazioni ruotando la cannuccia attorno al suo asse durante l'esperimento, o spostando la cannuccia verticalmente lungo la sua lunghezza durante le oscillazioni (Figura 4.26).

È possibile descrivere ciò che sta accadendo in questo esperimento facendo riferimento al meccanismo ACR. Questo esperimento è analogo alla piuma fluttuante di Gray, che oscilla in aria tra il tubo di vetro strofinato ed un oggetto solido (come un muro o una sedia). Vedi la Sezione 4.2.

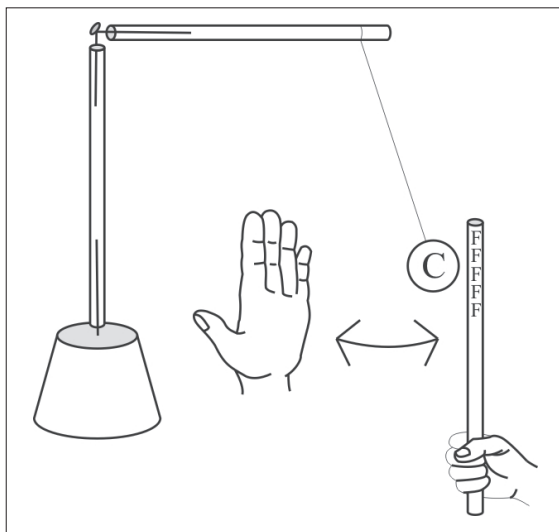
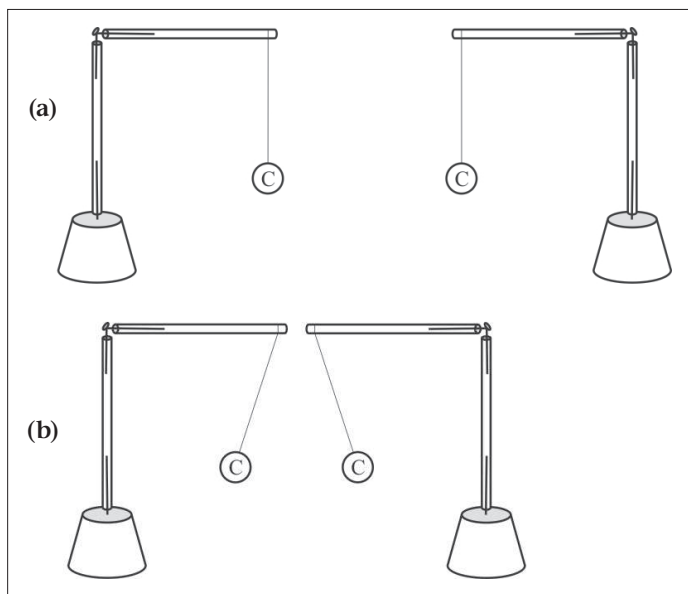



Figura 4.26. Pendolo che oscilla tra una plastica strofinata e una mano, toccando ciascuna di esse.

### Esperimento 4.16

Ora poniamo fianco a fianco due pendoli elettrici simili a quello utilizzato nell'Esperimento 4.7. Quando entrambi sono neutri, i due fili restano verticali. Possiamo fare che ciò accada toccando entrambi i dischi di carta con la nostra mano.

Strofiniamo una cannuccia di plastica e portiamola vicino ad ogni disco di carta, consentendo loro di toccare la cannuccia ed esserne respinti. Ora mettiamo via la cannuccia. Dopodiché, portiamo i pendoli che erano stati caricati per contatto vicini tra loro. Osserviamo che si respingono l'un l'altro. Entrambi i fili si inclinano rispetto alla verticale, allontanandosi l'uno dall'altro (Figura 4.27).

Figura 4.27. **(a)** Due pendoli carichi pendono verticalmente quando sono lontani l'uno dall'altro. **(b)** Due pendoli carichi si respingono l'un l'altro quando sono vicini.

A volte è necessario utilizzare fili di seta molto sottili, al fine di vedere questa separazione laterale. Quando i fili sono molto densi e pesanti, il loro peso ne riduce l'angolo. Inoltre, fili più corti creano angoli di separazione tra loro superiori rispetto ai fili più lunghi, a parità di distanza finale tra i dischi di carta. Ciò significa che fa comodo lavorare con fili corti poiché questo rende la repulsione più visibile.

In questo esperimento stiamo vedendo la repulsione tra due pendoli che erano stati caricati per contatto con un unico corpo elettrificato.

Ciò illustra anche l'azione e la reazione tra due corpi elettrizzati, un argomento discusso in precedenza nella Sezione 3.5.

**Esperimento 4.17**

Un esperimento analogo può essere fatto mettendo due palline di alluminio accartocciato al posto dei dischi di carta.

Ogni pallina può essere realizzata a partire da un quadrato o un cerchio, ritagliato da un foglio di alluminio per alimenti, di 2 o 3 cm di lato o diametro. Dopo essere state accartocciate, esse sono legate alle estremità di due fili di seta della stessa lunghezza e appesi come pendoli. Carichiamo entrambe le palline per contatto con una plastica strofinata, che viene poi allontanata. Dopo questa procedura, esse si respingono a vicenda quando i pendoli sono collocati vicini tra loro. Più corti sono i fili, maggiore sarà l'angolo di separazione supponendo una distanza costante fra le estremità superiori dei fili.

### 4.9 Il filo pendulo di Gray

Oltre al pendolo elettrico, è anche interessante realizzare un altro strumento che si chiama "filo pendulo". Esso fu creato da Stephen Gray nel 1729, come mezzo per rilevare se un corpo è carico[27].

Si tratta semplicemente di un filo di cotone o di lino sorretto dall'alto tramite un bastoncino di legno (Figura 4.28). Il pendolo elettrico era stato realizzato con un filo di seta o di nylon. Qui è importante utilizzare un filo di cotone o lino. Possiamo tenere il bastoncino con la nostra mano o fissarlo ad un altro sostegno adeguato.

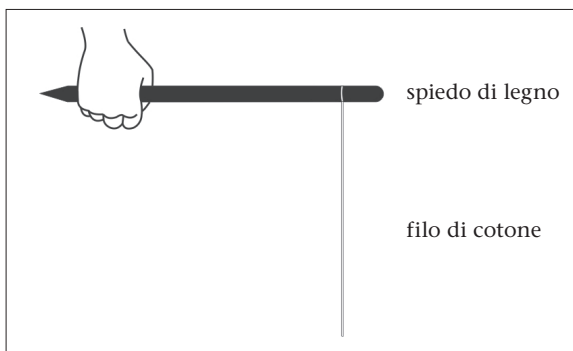



Figura 4.28. Filo pendulo di Gray.

**Esperimento 4.18**

Portiamo un pezzo neutro di plastica nei pressi di un filo pendulo. Non accade nulla, esso rimane verticale. Ora portiamo un pezzo strofinato di plastica nei pressi di un filo pendulo. Il filo s'inclina verso di esso (Figura 4.29).

Questa è l'utilità principale del filo pendulo. Ci dice in altri termini se un oggetto vicino è carico. Il filo pendulo di Gray era semplicemente un filo verticale sostenuto alla sua estremità superiore, con quella inferiore libera di muoversi in qualsiasi direzione. Il filo era realizzato in cotone o lino, senza alcuna piuma o altro corpo alla sua estremità inferiore. Al fine di verificare se un corpo fosse carico, egli avvicinava ad esso semplicemente il filo.

Quando il filo era attratto dal corpo, inclinandosi verso di esso, questo significava che l'oggetto era stato caricato elettricamente. All'epoca il metodo classico per determinare se un corpo fosse carico era quello di osservare se attirava materiali vicini leggeri, come nell'Esperimento 2.1. Con il suo strumento Gray aveva trovato un nuovo metodo, l'inclinazione del suo filo. Egli menzionò esplicitamente che questo nuovo metodo aveva una sensibilità maggiore rispetto al metodo più vecchio[28]:

Figura 4.29. Attrazione di un filo pendulo per mezzo di una plastica strofinata.

L'osservazione di queste attrazioni viene eseguita meglio tenendo il corpo attraente in una mano e nell'altra [mano] un fine filo bianco legato all'estremità di un bastoncino; in questo modo sarà possibile percepire gradi di attrazioni molto più deboli, piuttosto che ricorrendo a [pezzi di] foglioline di ottone.

**Esperimento 4.19**

Adesso lasciamo che il filo pendulo tocchi la plastica strofinata. Osserviamo che rimane attaccato ad essa (Figura 4.30).

Ciò differisce da quanto osservato nell'Esperimento 4.7, nel quale il pendolo elettrico era respinto dopo il contatto con la plastica strofinata. Ciò significa che il pendolo elettrico e il filo pendulo sono strumenti differenti, che presentano comportamenti diversi in situazioni analoghe. Il filo pendulo non è semplicemente un pendolo elettrico senza il disco di carta.

Figura 4.30. Il filo pendulo di Gray rimane attaccato a una plastica strofinata dopo il contatto.

## 4.10 Mappare la forza elettrica

Possiamo adattare un pendolo elettrico ed usarlo per mappare la forza elettrica, come è stato fatto con il versorium nella Sezione 3.4. Per farlo, dobbiamo creare un indicatore di forza elettrica. Questo è essenzialmente un pendolo elettrico in cui noi sostituiamo il disco di carta con una piccola freccia di carta, un ritaglio di alluminio per alimenti o un sottile cartone. La freccetta dovrebbe puntare in orizzontale ed essere sospesa al centro da un filo di seta o di nylon. Può essere lunga da 2 a 5 cm, con un asse verticale lungo da 0,2 a 0,5 cm, e con la larghezza massima della punta della freccia da 0,5 a 0,7 cm. Queste sono solo misure approssimative e non sono decisive.

Un modo pratico per costruire e poi attaccare la freccia è farlo con una cannuccia di plastica[29]. La sottile freccia di cartone può essere all'inizio lunga da 4 a 6 cm, con una lunghezza dell'asse da 0,2 a 0,5 cm, e la dimensione massima della punta freccia da 0,5 a 0,7 cm, per

Figura 4.31. Un indicatore di forza elettrica.

esempio. Tagliamo una cannuccia di plastica ottenendo un pezzo lungo da 3 a 5 cm. Mettiamo della colla su un lato della freccia e incolliamo la parte inferiore del filo di seta e la cannuccia su questo lato. Arrotoliamo l'asse della freccia intorno alla cannuccia, incollandoli insieme. Essa deve trovarsi in orizzontale quando è appesa liberamente. Se questo non accade, possiamo tagliar via una parte della cannuccia in modo da avere la freccia nella posizione corretta. È necessario costruire diversi indicatori di forza elettrica come questo (Figura 4.31).

### Esperimento 4.20

Ora ripetiamo la procedura dell'Esperimento 4.5. Strofiniamo cioè una cannuccia di plastica messa verticalmente su di un supporto adeguato. Poi la portiamo lentamente vicino all'indicatore di forza elettrica, inizialmente evitando che la freccia tocchi la plastica strofinata. Osserviamo che il pendolo è attratto dalla plastica strofinata, con il filo inclinato verso di essa. Inoltre, la punta della freccia si orienta verso la cannuccia, indipendentemente dalla sua posizione rispetto alla plastica strofinata. Questo dimostra che la forza elettrica esercitata dalla plastica sfregata punta verso di essa, come abbiamo visto nell'Esperimento 3.4.

### Esperimento 4.21

Ora ripetiamo l'Esperimento 4.20, questa volta permettendo alla freccia e alla plastica strofinata di entrare in contatto. Dopo il contatto, il pendolo è respinto dalla cannuccia, con il filo inclinato lontano da essa. Inoltre, la freccia punta radialmente in direzione opposta alla plastica strofinata (Figura 4.32).

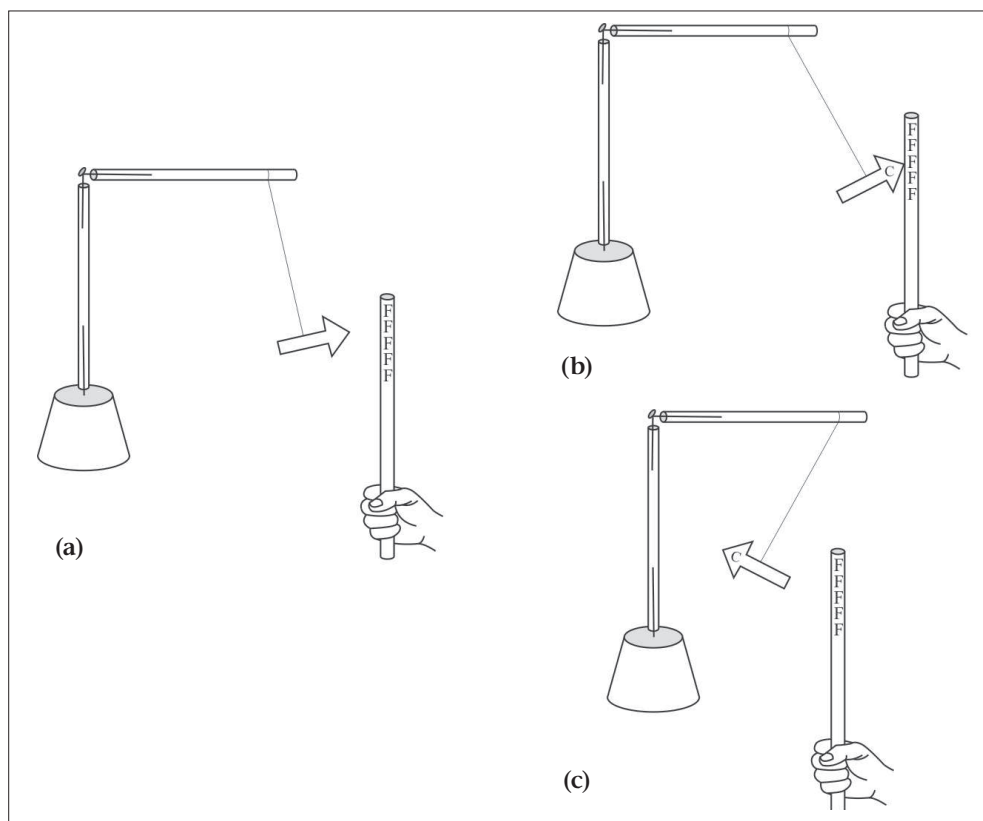
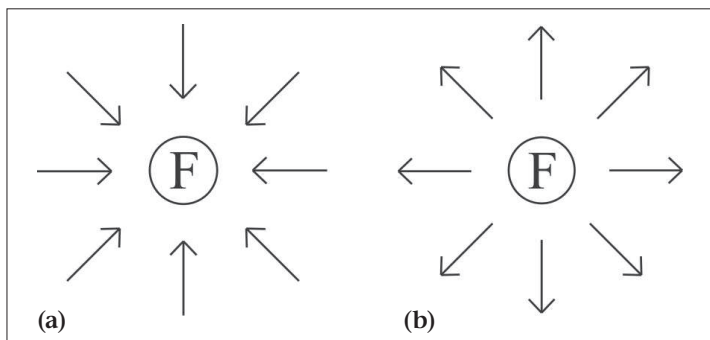



Figura 4.32. **(a)** Inizialmente la freccia punta verso la plastica strofinata, siccome è attratta da essa. **(b)** Essa tocca la cannuccia. **(c)** Dopo il contatto, la freccia è respinta dalla cannuccia, con la punta della freccia orientata in direzione opposta alla cannuccia.

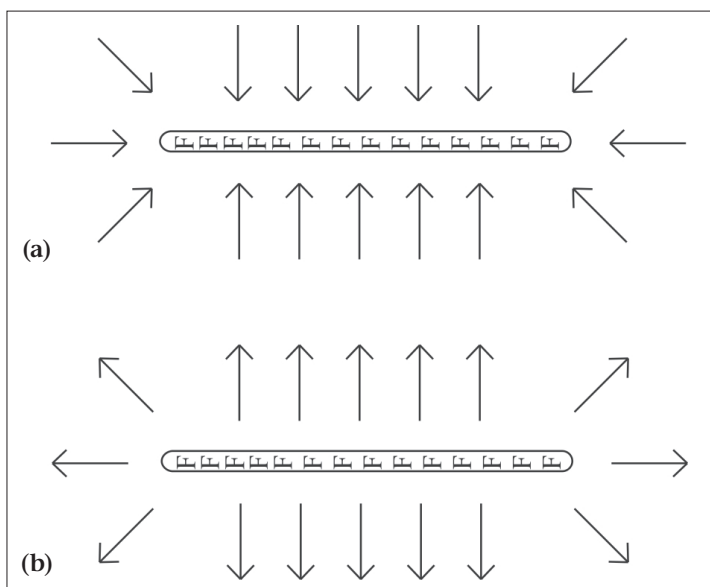
## Esperimento 4.22

Ora poniamo diversi indicatori di forza elettrica intorno ad una plastica strofinata. La procedura iniziale è simile a quella dell'Esperimento 4.20, cioè si impedisce il contatto tra le frecce e la cannuccia. Osserviamo che tutte le frecce puntano verso la plastica strofinata (Figura 4.33 (a)). Ora lasciamo che la cannuccia strofinata e le frecce si tocchino. Osserviamo che dopo il contatto ognuna di esse punta radialmente in direzione opposta alla cannuccia (Figura 4.33 (b)).

Figura 4.33. **(a)** Prima del contatto le frecce puntano verso la cannuccia strofinata, essendo attratte da essa. **(b)** Dopo il contatto esse puntano in direzione opposta alla plastica, essendo respinte da essa.

La differenza principale tra gli Esperimenti 4.20, 4.21 e 4.22, da un lato, e l'Esperimento 3.4 dall'altro, è che ora le frecce non indicano solo la direzione della forza (in questo caso una direzione radiale), ma anche se la forza è attrattiva (frecce che puntano verso la cannuccia strofinata) o repulsiva (frecce in direzione opposta rispetto alla cannuccia strofinata).

## Esperimento 4.23

Lo stesso esperimento può essere ripetuto con la cannuccia strofinata in posizione orizzontale. Prima del contatto le frecce puntano verso di essa, dopo il contatto lontano da essa, come nella Figura 4.34.

Figura 4.34. **(a)** Le frecce, che non toccano la cannuccia strofinata, sono attratte da essa. **(b)** In caso di contatto vengono respinte da essa.

**Esperimento 4.24**

Ora strofiniamo due cannucce di plastica per tutta la loro lunghezza con lo stesso materiale, ad esempio un foglio di carta. Queste cannucce sono affiancate verticalmente su appropriati supporti. L'indicatore di forza elettrica si sposta in prossimità delle cannucce, senza che si permetta loro di entrare in contatto. Osserviamo che la freccia è attratta da entrambe le cannucce, inclinandosi verso di loro. L'orientamento delle frecce in posizioni diverse intorno alle cannucce è mostrato nella Figura 4.35 (a). L'orientamento di ciascuna freccia tiene conto dell'influenza di entrambe le cannucce. Ciò è simile alla somma vettoriale delle forze o delle coppie esercitate da ciascuna cannuccia. Quanto mostrato è analogo all'Esperimento 3.5.

Ripetiamo questo esperimento, ma ora consentendo il contatto tra le cannucce e le plastiche strofinate. Dopo il contatto le frecce sono respinte dalle cannucce, come indicato nella Figura 4.35 (b).

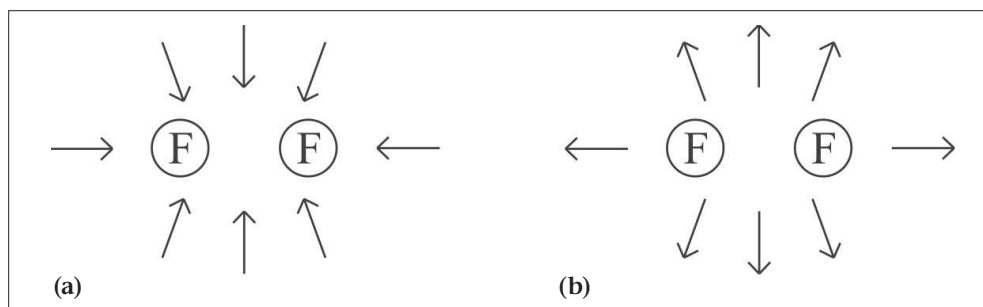



Figura 4.35. Indicatori di forza elettrica attratti, (**a**), e respinti, (**b**), da due plastiche strofinate.

Questi esperimenti indicano la natura vettoriale delle forze elettriche, sia che esse siano attrattive o che siano repulsive. Il vantaggio di queste mappature con le frecce, rispetto alla mappatura con i versorium, è che le frecce non indicano solo la direzione delle forze, ma anche se esse sono attrattive o repulsive.

**Esperimento 4.25**

Lo stesso effetto può essere ottenuto con una serie di versorium di Du Fay, anziché con semplici versorium di metallo. Strofiniamo una plastica e posizioniamo la parte

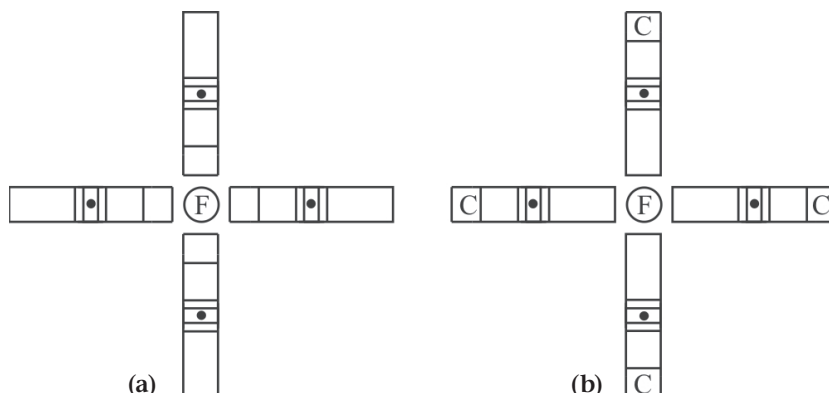



Figura 4.36. **(a)** La parte d'alluminio di ogni versorium di Du Fay è attratta da un pezzo di plastica strofinato. **(b)** Dopo il contatto essa è respinta dalla cannuccia carica.

strofinata allo stesso livello del piano dei versorium. Mettiamo la plastica strofinata vicino ai versorium, evitando il loro contatto. I versorium ruotano attorno ai loro assi. Dopo aver raggiunto l'equilibrio ed essersi fermati, le parti d'alluminio dei versorium puntano verso la plastica strofinata (Figura 4.36 (a)).

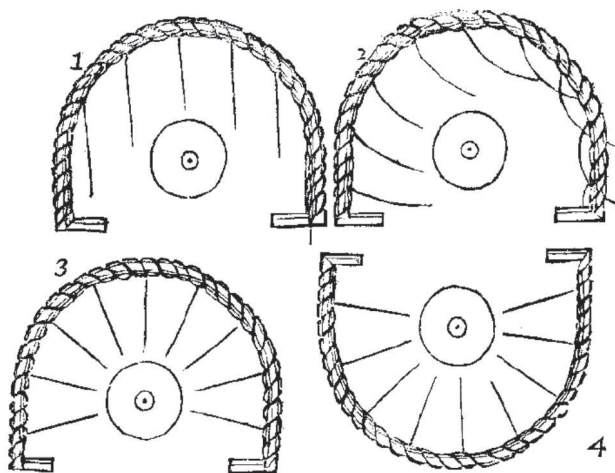
Permettiamo ora il contatto tra la plastica strofinata e l'alluminio, fino a che essi non vengano respinti dalla plastica. I versorium ruotano e, nelle nuove posizioni di equilibrio, le parti d'alluminio puntano lontano dalla cannuccia strofinata (Figura 4.36 (b)).

Con i versorium di Du Fay possiamo anche ottenere mappature analoghe a quelle degli Esperimenti 4.23 e 4.24.

## 4.11 Hauksbee e la mappatura delle forze elettriche

Probabilmente la prima persona a mappare le forze elettriche fu Hauksbee nel 1706. Egli utilizzò la macchina elettrica di sua invenzione, descritta nella Sezione 4.2 (Figura 4.8). Sostituì il globo di vetro con un tubo di vetro di forma cilindrica, sorretto orizzontalmente o verticalmente, in modo da poter ruotare ad alta velocità attorno al suo asse. Mentre girava, esso era strofinato con le mani o con un foglio di carta. Ecco la descrizione del suo esperimento[30]:

> *Una continuazione degli esperimenti sullo sfregamento del vetro.*
> Mi procurai un vetro quasi cilindrico, di lunghezza e diametro di circa sette pollici ciascuno [18 cm], il cui movimento [rotazione attorno al suo asse di simmetria] era dato da una macchina di nuova invenzione; il suo asse giaceva parallelo all'orizzonte, cosa che in simili esperimenti prima d'ora effettuati, era diametralmente opposta a questa. [...]
> Ora quello che devo aggiungere, scaturito sempre dall'osservazione che i corpi leggeri sarebbero in teoria ugualmente attratti, o graviterebbero allo stesso modo, è che io piegai un cavo in modo che assumesse la forma di semicerchio e lo fissai a una distanza costante [dall'asse del cilindro] intorno alla superficie superiore del vetro a 4 o 5 pollici [10 o 13 cm] da esso. Questo cavo aveva attorcigliato intorno ad esso dello spago, per cui potei con facilità appendere i fili [di lino, cotone, o lana] a distanze pressoché simili; le estremità inferiori di questi potevano avvicinare il vetro a meno di un pollice [2,54 centimetri], se tirate verso il centro di esso, ma apparivano, quando erano liberi, come nella Figura 1 [Figura 4.37][31].

Figura 4.37. Mappatura della forza elettrica di Hauksbee. Visione laterale del cilindro di vetro che mostra le posizioni dei fili quando il cilindro è: **(1)** immobile e non elettrizzato; **(2)** in rotazione e non elettrizzato, con le correnti d'aria intorno ad esso che trascinano i fili tutti nella stessa direzione; **(3)** e **(4)**, in rotazione ed elettrizzato, nel qual caso, nonostante la continua presenza di correnti d'aria, ogni filo si drizza e punta verso l'asse del cilindro.

E qualora il cilindro fosse fatto girare abbastanza rapidamente, quei fili sarebbero mossi dall'aria agitata, come in Fig. 2. Ma se nella parte inferiore del vetro [girevole] fosse applicata la mia mano [per caricare il vetro per attrito], allora i fili si sarebbero disposti come in Fig. 3. E da tutte le parti sembrerebbero gravitare, o essere attratti lungo una linea diretta verso il centro del corpo in movimento [cioè verso l'asse del cilindro], non subendo alcun inconveniente o disturbo della postura dal vento causato dalla rapidità del movimento; ed io ho potuto spostando [la posizione dello] sfregamento, trarli allineati verso entrambe le estremità del cilindro; sempre però puntando verso l'asse di esso. E se il cavo [semicircolare] con i fili fosse capovolto, come ho provato allora, cioè, circondando la parte inferiore del cilindro, come prima la superiore, esso risponderebbe esattamente come nell'altro caso; con i fili tutti diretti verso l'asse di esso: Vedi la Fig. 4 [Figura 4.37]. Allo stesso modo ho messo in moto lo stesso vetro in una postura perpendicolare, nel senso che ho avuto l'opportunità di porre un cavo circolare orizzontalmente, coi fili come prima, e lasciato solo una piccola parte esposta per il tocco delle mie dita tra di essi; eppure i fili, a causa del moto e dello sfregamento dato al cilindro, si sono elevati dalla loro postura appesa, facendo tutto intorno un piano orizzontale, ed indirizzando le loro estremità libere all'asse come nell'altro caso. Ora, fino a che punto questo esperimento può servire a spiegare la natura di elettricità, magnetismo, o gravitazione dei corpi, è oltre le mie competenze di determinare; ma con tutta umiltà sottopongo ciò a quegli istruiti Signori di questa onorata Società, che hanno già trattato quegli argomenti.

## Note

[1] [Hei99, pp. 215-218].
[2] [Kra81].
[3] [Gue94, Libro 4, Capitolo 15, pp. 227-231].
[4] [RR57, pp. 565-568], [Kra81] e [Hei99, pp. 215-216].
[5] [Hau09, Tavola VII], [RR57, pp. 565-568], [Hom67], [Hom81, pp. xiv-xv, 14, 42, 77 e 78n], [Que], [Hei81d] e [Hei99, pp. 230-234].
[6] [Chi54], [Haub], [RR57, pp. 570 e 584-585], [Hom81, p. 13] e [Hei99, pp. 235-236].
[7] [Chi54].
[8] [Hei81c] e [Hei99, p. 236].
[9] [Chi54, pp. 34-35]
[10] [Hei99, pp. 5 e 255-258].
[11] [Hei81b].
[12] [DF33a], [DF33c], [DF33d], [DF33b], [DF], [DF34a], [DF34b], [DF37b] e [DF37a].
[13] [DF33b, pp. 457-458].
[14] "De l'Attraction & Répulsion des Corps Électriques.
Nous avons toûjours considéré jusqu'a présent la vert électrique en général, & sous ce mot on a entendu non seulement la vertu qu'ont les corps électriques d'attirer, mais aussi celle de repousser les corps qu'ils ont attirés. Cette repulsion n'est pas toûjours constante, & elle est sujette à des variétés qui m'ont engagé à l'examiner avec soin, & je crois avoir découvert quelques principles très-simples qu'on n'avoit point encore supçonnés, & qui rendent raison de toutes ces varietés, ensorte que je ne connois jusqu'à présent aucune expérience qui ne s'y accorde très-naturellement.
J'avois observé que les corps légers n'etoient ordinairement repoussés par le tube que lorsque l'on en approchoit quelque corps d'un volume un peu considérable, & cela me faisoit penser que ces derniers corps étoient rendus électriques par l'approche du tube, & qu'alors ils attiroient à leur tour le duvet, ou la feuille d'or, & qu'ainsi il étoit toûjours attiré, soit par le tube, soit par les corps voisins, mais qu'il n'y avoit jamais de répulsion réelle.
Une expérience que M. de Reaumur m'indiqua, s'oppsoit à cette explication; elle consiste à poser au bord d'une carte un petit monceau de poudre à mettre sur l'écriture, on approche de ce monceau un bâton de cire d'Espagne rendu électrique, & on voit très-clairement qu'il chasse au de-là de la carte des particules de poudre, sans qu'on puisse supçonner qu'elles soient attirées par aucun corps voisin.
Une autre expérience aussi simple, & encore plus sensible, acheva de me prouver que ma conjecture étoit fausse. Si l'on met des feuilles d'or sur une glace, & que l'on approche le tube par dessous, les feuilles sont chassées en haut sans retomber sur le glace, & on ne peut certainement expliquer ce mou-

vement par l'attraction d'aucun corps voisin. La même chose arrive à travers la gaze de couleur, & les autres corps qui laissent passer les écoulements électriques, en forte qu'on ne peut pas douter qu'il n'y ait une répulsion réelle dans l'action des corps électriques."

[15] Ceralacca [n.d.t.].

[16] [Grah, p. 35].

[17] [DF33d, p. 247].

[18] J'avois de plus le soin de toucher la boule avec la main après chaque station qu'on avoit faite avec le tube, afin de lui ôter toute la vertu qu'elle auroit pû avoir conservée par l'approche du tube; cela la d´epouille en effet de toute son électricité, ainsi que l'a remarqué M. Gray; [...]

[19] [Grab, p. 107].

[20] [DF33b, pp. 473-474].

[21] [Hei99, pp. 5 e 255-258].

[22] [DF33b, p. 458].

[23] "Enfin ayant refléchi sur ce que les corps les moins électriques par eux-mêmes étoient plus vivement attirés que les autres, j'ai imaginé que le corps électrique attiroit peut- être tous ceux que ne le sont point, & repoussoit tous ceux que le sont devenus par son approche, & par la communication de sa vertu. [...]

[24] [DF33b, pp. 459-460].

[25] "L'explication de tous ces faits est bien simple, en supposant le principe que je viens d'avancer; car, dans le premiére expérience, losqu'on laisse tomber la feuille sur le tube, il attire vivement cette feuille qui n'est nullement électrique, mais dès qu'elle a touché le tube, ou qu'elle l'a seulement approché, elle est renduë électrique elle-même, & par consquént elle en est repoussée, & s'en tient toûjours éloignée, jusqu'à ce que le petit tourbillon électrique qu'elleavoit contracté soit dissipé, ou du moins considérablement diminué; n´etant plus repoussée alors, elle retombe sur le tube où elle reprend un nouveau tourbillon, & par conséquent de nouvelles forces pour l'éviter, ce qui continüera tant que le tube conservera sa vertu."

[26] [DF, pp. 262-263].

[27] [Grad], [Graf] e [Grai].

[28] [Graf, p. 289].

[29] [FM91].

[30] [Haua, pp. 2332-2335].

[31] [Haua] e [RR57, p. 568].

# Capitolo 5

# Cariche positive e negative

### 5.1 Esiste un solo tipo di carica?

Eseguiamo alcuni esperimenti analoghi all'Esperimento 4.7. Utilizziamo i seguenti strumenti: due pendoli elettrici, definiti *I* e *II*, e un versorium di metallo. Inoltre, impiegheremo anche i seguenti materiali: due cannucce di plastica, due righelli acrilici, due bicchieri di vetro, due calze di seta e due pezzi di stoffa fatta di fili acrilici. I materiali e le loro forme, presenti nei seguenti esperimenti, sono descritti in Figura 5.1. Invece di due calze di seta possiamo anche utilizzare due tessuti in poliammide sintetico.

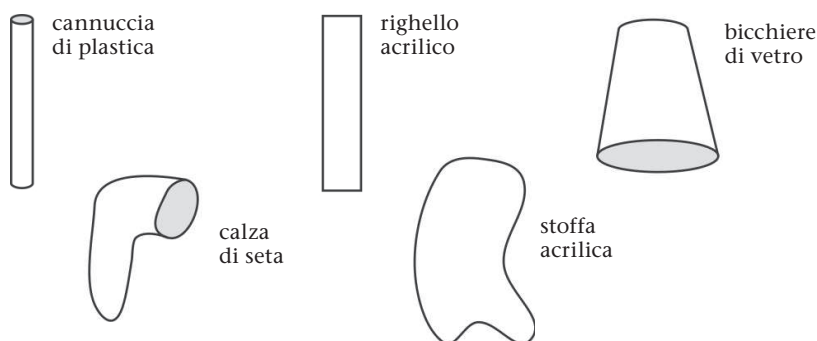



Figura 5.1. Materiali utilizzati nei prossimi esperimenti.

I rocchetti di "lana" normalmente venduti nei negozi al giorno d'oggi sono realizzati al 100% con fili acrilici sintetici. Supporremo di usare un panno o una camicetta realizzata con questi fili acrilici. Per quanto riguarda le calze, bisogna fare attenzione ad utilizzare solo quelle in seta o di un tessuto in poliammide sintetico. Nelle figure seguenti si farà riferimento ad una di queste calze o ad uno di questi tessuti in poliammide sintetica come "calza di seta".

Lo scopo di questi esperimenti è di mostrare che diversi materiali sfregati presentano differenti cariche elettriche. Prima di iniziare ogni esperimento dobbiamo toccare il versorium e i dischi di carta dei pendoli elettrici con il nostro dito per scaricarli. Questo deve essere ripetuto prima di avvicinare ai pendoli ciascuno degli oggetti sfregati. Il versorium sarà utilizzato per testare se i corpi sono neutri o carichi. Una cannuccia, un bicchiere, una calza e un righello devono essere neutri, cioè non devono influire sul versorium, perciò essi non saranno strofinati durante l'esperimento.

Per elettrizzare il vetro, di norma esso deve essere asciutto. Inoltre, è necessario che il vetro sia riscaldato prima di essere strofinato, altrimenti si scaricherà attraverso la nostra mano. La manipolazione lascia del sudore sul vetro e questo dovrebbe essere evitato. Esso può essere riscaldato dal fuoco o in un forno a microonde prima di ogni sfregamento. Se non si riesce a caricare un dato vetro, potrebbe essere necessario provare vetri di altra composizione, o altri tipi di vetro, fino a trovare un adeguato vetro caricabile.

I tessuti acrilici saranno utilizzati per strofinare tutti questi materiali. Possiamo matenere la cannuccia di plastica (o il righello acrilico, o la calza seta) con il panno acrilico e tirarla rapidamente con l'altra mano. Possiamo anche strofinare il panno rapidamente sulla superficie del vetro. Quando strofiniamo un oggetto con la calza di seta, porremo la lettera S sul corpo. Quando questo oggetto viene strofinato con un panno acrilico, useremo la lettera A. Porremo due lettere sui dischi di carta che hanno prima toccato i corpi sfregati e, successivamente, ne sono stati respinti. La prima rappresenta la sostanza dell'oggetto toccato dal disco di carta. La seconda lettera rappresenta il materiale con cui è stato strofinato l'oggetto. I materiali che costituiscono gli oggetti saranno indicati con le lettere P, G, A, ed S. Essi indicano rispettivamente plastica, vetro (la lettera G proviene dalla parola "glass" in inglese), acrilico e seta. Per esempio, le lettere PA su un disco di carta indicano che esso ha toccato un pezzo di plastica che era stato strofinato con un panno acrilico e il disco di carta è stato poi respinto dalla plastica strofinata.

Per prima cosa tocchiamo il versorium ed i due dischi di carta dei pendoli con il nostro dito. Avviciniamo al versorium la cannuccia non strofinata (o il bicchiere, la calza, il righello, o il panno), osservando che tutti questi corpi sono elettricamente neutri, in quanto non dovrebbero orientare il versorium. Quando uno qualsiasi di questi materiali non strofinati orienta il versorium, esso deve essere sostituito da un altro materiale non strofinato che non orienta il versorium e sia quindi davvero elettricamente neutro. Durante l'esperimento strofineremo una cannuccia, un bicchiere, una calza e un righello. I seguenti esperimenti funzionano solo quando questi oggetti sono caricati per strofinio con successo. Per essere sicuri che questo meccanismo di carica abbia funzionato, avvicineremo al versorium ciascuno di questi oggetti prima di portarli in prossimità dei pendoli. Possiamo continuare con l'esperimento solo quando il versorium si orienta verso questi corpi. Questa precauzione è particolarmente rilevante nel caso del vetro. Come accennato prima, non è sempre facile mantenere elettrizzato un vetro strofinato. A causa del contatto con la nostra mano esso può essere facilmente scaricato. Da ora in poi supporremo che tutti gli oggetti strofinati siano stati caricati con successo.

### Esperimento 5.1

Una cannuccia di plastica che è stata strofinata con un panno acrilico si muove vicino al primo pendolo neutro. Il pendolo è attratto, tocca la cannuccia, ed è poi respinto da essa (Figura 5.2 (a)). Togliamo la cannuccia e il pendolo torna verticale. Strofiniamo una calza di seta con un altro panno acrilico. Portiamo questa calza strofinata vicino al secondo pendolo neutro. Esso è attratto dalla calza, la tocca, e viene quindi respinto da essa (Figura 5.2 (b)). Togliamo la calza e il pendolo torna verticale.

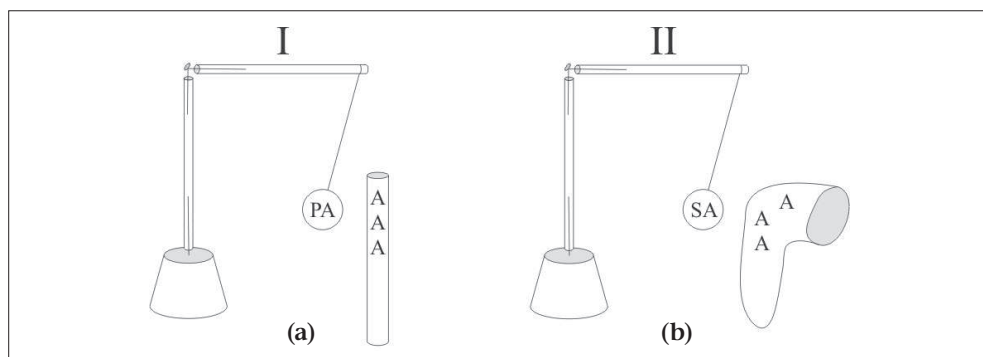



Figura 5.2. Dopo il contatto, i pendoli sono respinti dagli oggetti che li hanno toccati. La lettera *A* sulla cannuccia indica "strofinato con della stoffa acrilica". Sul disco di carta, le lettere *PA* indicano "toccato da plastica strofinata con della stoffa acrilica" mentre le lettere *SA* indicano "toccato da calza di seta strofinata con della stoffa acrilica".

Passiamo ora lentamente la seta strofinata vicino al primo pendolo, non permettendo loro un contatto reciproco. Si osserva una forte attrazione tra loro (Figura 5.3 (a))! Quando noi portiamo lentamente la cannuccia strofinata vicino al secondo pendolo, sempre evitandone il contatto, si osserva un'altra forte attrazione (Figura 5.3 (b)).

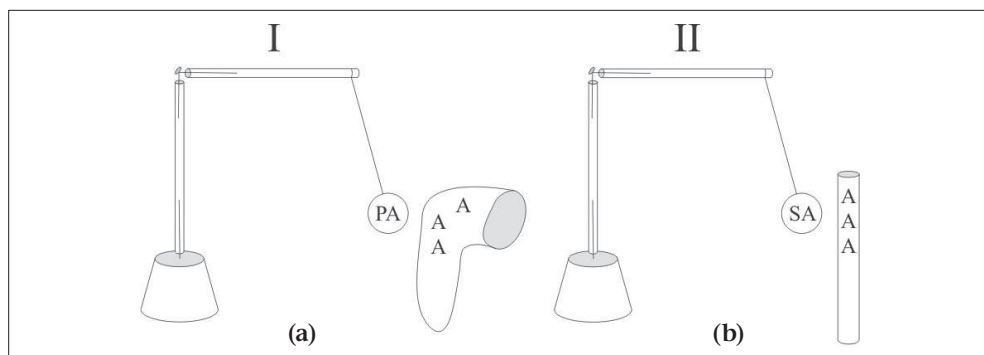



Figura 5.3. **(a)** Il primo pendolo, caricato per contatto con una plastica strofinata con della stoffa acrilica, è attratto da una calza di seta strofinata con della stoffa acrilica. **(b)** Il secondo pendolo, caricato per contatto con una calza strofinata con una stoffa acrilica, è attratto da una cannuccia di plastica strofinata con una stoffa acrilica.

## Esperimento 5.2

Il bicchiere di vetro è riscaldato e strofinato con un panno acrilico. La porzione di vetro strofinata viene portata lentamente vicino al primo pendolo, che era stato caricato per contatto con la cannuccia nell'Esperimento 5.1, evitando che il vetro ed il disco di carta del pendolo entrino in contatto. Si osserva una forte attrazione tra il vetro strofinato ed il pendolo carico (Figura 5.4 (a)). D'altra parte, quando la porzione strofinata del vetro è lentamente portata vicino al secondo pendolo, che era stato caricato dal contatto con la calza di seta nell'Esperimento 5.1 (nessun contatto tra il vetro e il disco di carta del pendolo), osserviamo che si respingono l'un l'altro (Figura 5.4 (b)). Quindi possiamo concludere che il vetro caricato si comporta come la calza carica e non come la cannuccia carica.

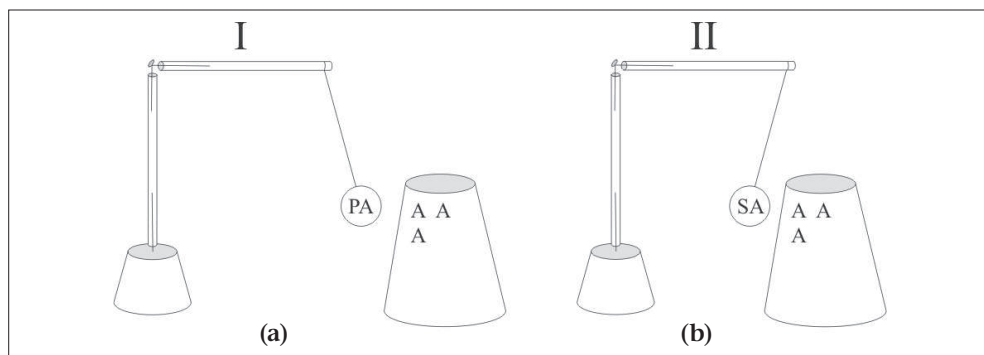



Figura 5.4. **(a)** Il primo pendolo, caricato per contatto con una plastica strofinata con un panno acrilico, è attratto da un bicchiere strofinato con un panno acrilico. **(b)** Il secondo pendolo, caricato dal contatto con una calza di seta strofinata con un panno acrilico, viene respinto da un bicchiere di vetro strofinato con un panno acrilico.

**Esperimento 5.3**

Strofiniamo il righello acrilico nel tessuto acrilico, dopodiché il righello viene avvicinato lentamente al primo pendolo, che era stato caricato dal contatto con la cannuccia strofinata con un panno acrilico, impedendo il contatto tra il righello e il pendolo. Osserviamo che si respingono l'un l'altro (Figura 5.5 (a)). D'altra parte, quando il righello strofinato viene portato lentamente in prossimità del secondo pendolo, che era stato caricato dal contatto con la calza di seta strofinata con un panno acrilico, essi sono fortemente attratti (Figura 5.5 (b)). Così possiamo concludere che il righello carico agisce come la cannuccia carica e non come la calza carica o come il bicchiere carico.

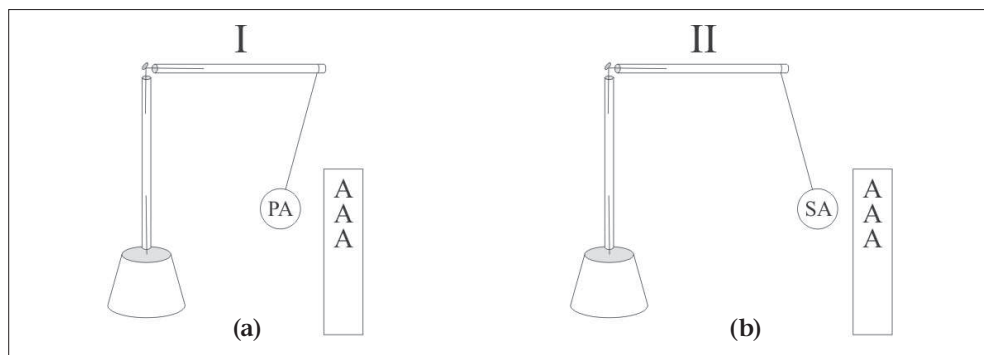



Figura 5.5. **(a)** Il primo pendolo caricato per contatto con una plastica strofinata con un panno acrilico, viene respinto da un righello acrilico strofinato con un panno acrilico. **(b)** Al contrario, il secondo pendolo caricato per contatto con una calza di seta strofinata con un panno acrilico, è attratto da un righello acrilico strofinato con un panno acrilico.

L'ordine di questo esperimento può essere invertito e il risultato resta lo stesso. Per esempio, scarichiamo i pendoli, strofiniamo il righello acrilico in una stoffa acrilica e questo righello carichi il primo pendolo per contatto. Il bicchiere di vetro sia riscaldato, poi strofinato con un panno acrilico e carichi il secondo pendolo per contatto. Quando il righello (o la cannuccia) strofinato con un panno acrilico è lentamente portato vicino al primo pendolo, senza contatto, si verifica una repulsione. Quando questo righello (o cannuccia) è lentamente portato in prossimità del secondo pendolo, ancora una volta senza contatto, si verifica un'attrazione. Al contrario, quando portiamo lentamente il vetro (o la seta) strofinata con un panno acrilico vicino al primo pendolo carico, senza contatto, si verifica una forte attrazione. Portando lentamente il vetro (o la seta) strofinato con il panno acrilico in prossimità del secondo pendolo carico, senza contatto, si produce una repulsione.

Questi esperimenti possono essere ripetuti con altri materiali producendo risultati simili. Ci sono sempre attrazioni o repulsioni tra corpi caricati per strofinio e pendoli caricati per contatto. E i corpi carichi possono essere divisi in due gruppi distinti. Nel nostro esempio, il primo gruppo è costituito dalla cannuccia di plastica strofinata con un panno acrilico, il righello acrilico strofinato con panno acrilico, il pendolo elettrico caricato per contatto con una cannuccia strofinata con un panno acrilico o con un righello strofinato con un panno acrilico. Il secondo gruppo è composto dal vetro strofinato con un panno acrilico, dalla calza di seta strofinata con panno acrilico, dal pendolo elettrico caricato per contatto con il vetro strofinato con un panno acrilico o con la calza di seta strofinata con un panno acrilico.

**Osservazioni sperimentali**: Si rileva quanto segue: gli oggetti nel primo gruppo si respingono a vicenda; gli oggetti nel secondo gruppo si respingono ugualmente, mentre quelli di diversi gruppi si attraggono l'un l'altro.

**Definizioni:** Gli oggetti del primo gruppo sono detti *carichi negativamente*, *negativi*, o diciamo che hanno acquisito una *carica negativa*. Oggetti del secondo gruppo sono detti *carichi positivamente*, *positivi*, o diciamo che hanno acquisito una *carica positiva*. Nelle figure che seguiranno rappresenteremo questa convenzione con i simboli "–" e "+", rispettivamente.

Ci sono repulsioni tra corpi che hanno cariche dello stesso segno nelle Figure 5.2 (a) e (b), 5.4 (b), e 5.5 (a). Ci sono attrazioni tra corpi carichi con cariche opposte nelle Figure 5.3 (a) e (b), 5.4 (a), e 5.5 (b).

## Esperimento 5.4

Le attrazioni descritte nell'Esperimento 5.1 sono diverse dalle attrazioni che avvengono tra un pendolo carico e un corpo neutro. Allo scopo di verificare ciò, ripetiamo la parte iniziale dell'esperimento, caricando il pendolo *I* negativamente per contatto con una cannuccia negativa (strofinata con panno acrilico) e caricando il pendolo *II* positivamente per contatto con una calza di seta positiva (strofinata con un panno acrilico). Quando noi portiamo lentamente la cannuccia strofinata vicino al pendolo *II*, senza permettere loro di entrare in contatto, osserviamo un'attrazione molto maggiore rispetto all'attrazione che si verifica tra questo pendolo e una cannuccia neutra.

L'intensità della forza può essere misurata mediante tre grandezze, vale a dire: (a) distanza minima, (b) angolo d'inclinazione per una distanza assegnata tra la cannuccia e la verticale passante attraverso il punto di appoggio del filo del pendolo e (c) angolo di inclinazione per una distanza assegnata tra la cannuccia e il disco del pendolo.

(a) La prima quantità è la distanza minima per cui l'attrazione comincia ad essere rilevata, ed essa è mostrata dal movimento iniziale del pendolo dovuto all'avvicinamento della cannuccia. Questa distanza minima è maggiore tra corpi di carica opposta rispetto a quella tra un corpo carico e un corpo neutro. (b) La seconda quantità è l'angolo di inclinazione di un pendolo rispetto alla verticale, fissata la distanza tra il corpo e la verticale passante per il punto di sostegno del filo del pendolo. Ancora una volta osserviamo che questo angolo è maggiore per l'attrazione tra corpi di carica opposta rispetto all'angolo per l'attrazione tra un corpo carico ed uno neutro. (c) La terza grandezza è l'angolo di inclinazione del pendolo rispetto alla verticale, a parità di distanza tra il disco e la cannuccia. Questo angolo è maggiore per l'attrazione tra i corpi di carica opposta rispetto all'angolo per l'attrazione tra un corpo carico ed un corpo neutro (Figura 5.6). Queste tre grandezze mostrano che detta forza di attrazione è chiaramente molto più grande tra corpi di carica opposta, rispetto a quella tra un corpo carico e un corpo neutro. Possiamo così concludere che l'intensità varia a seconda se l'oggetto portato vicino al pendolo è neutro o carico.

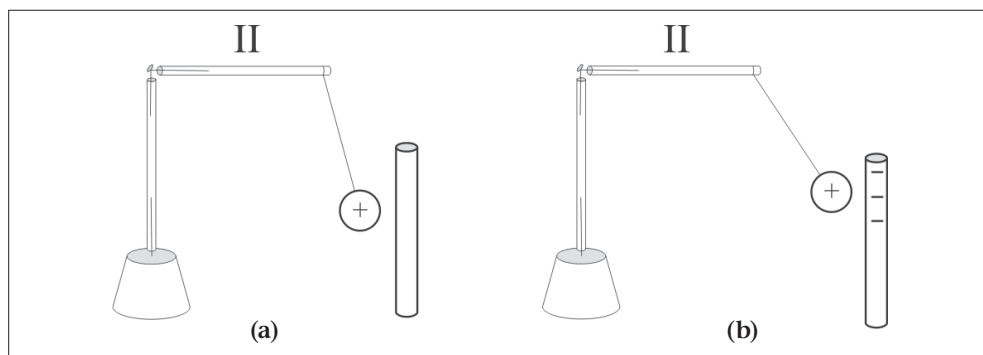



Figura 5.6. **(a)** L'attrazione tra un pendolo positivo e una cannuccia neutra è minore dell'attrazione tra un pendolo positivo e una cannuccia negativa, **(b)**.

Allo stesso modo, quando portiamo lentamente la calza strofinata vicino al pendolo *I* caricato negativamente, senza consentire loro di toccarsi, si osserva una maggiore attrazione tra loro rispetto all'attrazione tra una calza neutra ed il pendolo *I* caricato negativamente (Figura 5.7).

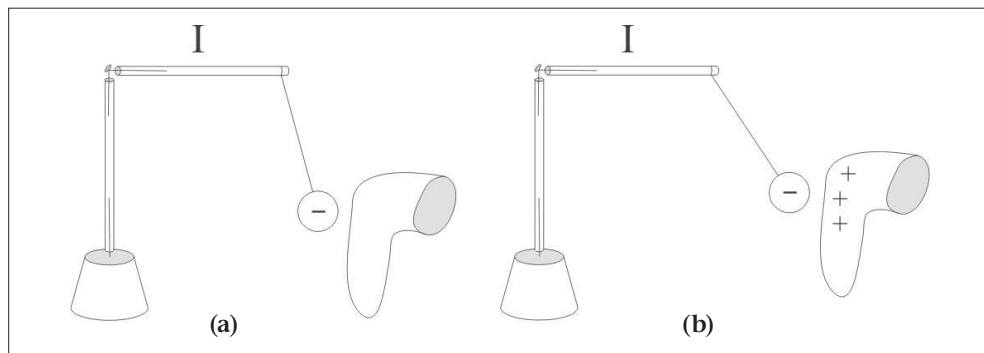



Figura 5.7. **(a)** L'attrazione tra una calza neutra e un pendolo negativo è minore dell'attrazione tra pendolo negativo e calza positiva, **(b)**.

## Esperimento 5.5

È anche possibile osservare un'altra distinzione tra corpi neutri e corpi carichi. Supponiamo che il pendolo *I* sia carico negativamente e il pendolo *II* sia carico positivamente, come nell'Esperimento 5.1. C'è repulsione quando un corpo caricato negati-

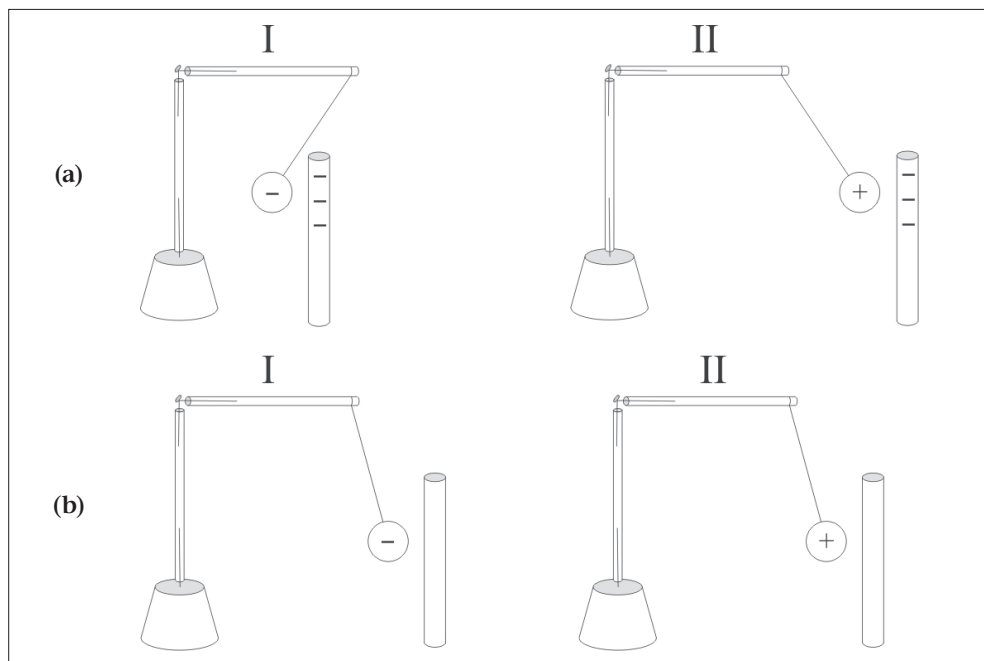



Figura 5.8 **(a)** Un corpo negativo (la cannuccia strofinata) respinge un altro corpo negativo (il disco di carta del pendolo *I*) ed attrae fortemente un corpo positivo (il disco di carta del pendolo *II*). **(b)** Un corpo neutro (la cannuccia non strofinata) attrae corpi negativi e positivi (i dischi di carta dei pendoli *I* e *II*). Inoltre, le intensità di queste forze nei casi **(a)** sono superiori a quelle che si manifestano nei casi **(b)**.

vamente è lentamente avvicinato al pendolo *I*, mentre vi è attrazione quando questo corpo è lentamente portato vicino al pendolo *II*, si veda la Figura 5.8 (a). Il contrario accade quando un corpo caricato positivamente è lentamente avvicinato a questi pendoli. D'altra parte, vi è attrazione quando si passa un corpo neutro vicino sia al pendolo *I* che al pendolo *II*. Si veda la Figura 5.8 (b). A volte tale attrazione è così piccola che è difficile rilevarla.

### Esperimento 5.6

Ora eseguiamo alcuni esperimenti analoghi all'Esperimento 4.4. Essi sono più facili da eseguire se due persone lavorano insieme. Essi richiedono due cannucce di plastica, due panni in acrilico (vedi l'Esperimento 5.1) e due fiocchi di cotone, ad esempio di ovatta. Ogni piccola quantità di ovatta dovrebbe impiegare circa 10 secondi per cadere in aria da 2 metri d'altezza. Si possono anche usare semi di dente di leone al posto dei fiocchi di ovatta. Le due cannucce devono essere strofinate per bene con un panno acrilico, in modo che diventino negativamente cariche. Ogni persona mantiene una cannuccia in orizzontale da una delle sue estremità. Con l'altra mano ogni persona rilascia l'ovatta poco al di sopra della sua cannuccia. L'ovatta è attratta dalla cannuccia e si attacca ad essa. I filamenti però sono spinti all'esterno, essendo respinti dalla cannuccia. Talvolta l'ovatta salta verso l'alto e comincia a cadere in aria. Quando ciò non accade, dobbiamo soffiare lentamente sull'ovatta finché non viene rilasciata dalla cannuccia. Possiamo quindi farla fluttuare in aria spostando continuamente la cannuccia che la respinge dal basso. In questa situazione l'ovatta e la cannuccia sono negativamente cariche.

Il nuovo esperimento può ora cominciare. Entrambe le persone stanno mantenendo i loro fiocchi fluttuanti in aria sopra le loro cannucce sfregate. Ora dovrebbero cercare di dirigerli l'uno verso l'altro, cercando di metterli in contatto in aria. Tuttavia, essi non si toccano mai, per quanto ci sforziamo. Essi non si avvicinano mai abbastanza da entrare in contatto. È facile capire questo fatto utilizzando principio ACR di Du Fay. Ogni pezzo fluttuante di cotone è respinto dalla rispettiva cannuccia in quanto entrambi hanno cariche dello stesso segno (negativo in questo caso). Poiché entrambi sono anch'essi carichi negativamente, si respingono l'un l'altro. In conclusione, non possiamo farli toccare, per quanto ci sforziamo (Figura 5.9).

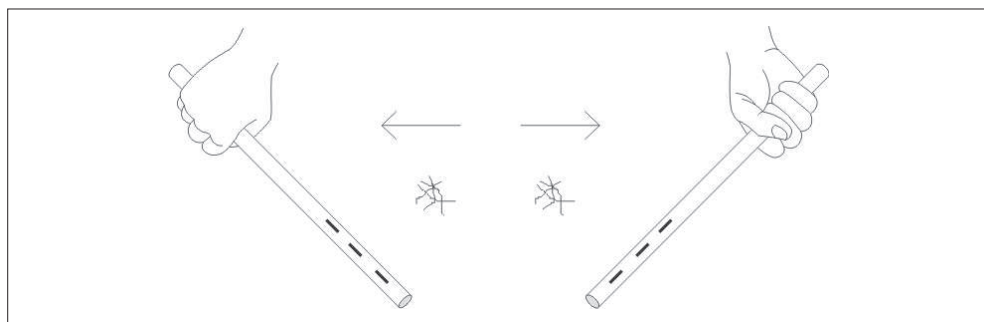



Figura 5.9. Non è possibile far collidere due pezzi di cotone carichi negativamente.

### Esperimento 5.7

In questo esperimento utilizziamo di nuovo due cannucce di plastica che sono state caricate negativamente strofinandole con un panno acrilico, come nell'Esperimento 5.6. Ma ora adoperiamo un solo fiocco d'ovatta. Inizialmente facciamolo fluttuare sopra la cannuccia che è stata strofinata con un panno acrilico, in virtù del meccanismo ACR,

come nell'Esperimento 4.4. A questo punto portiamo la seconda cannuccia negativa orizzontalmente nei pressi del cotone fluttuante. Osserviamo che questo si allontana da detta cannuccia, dato che è anche respinto da essa (Figura 5.10).

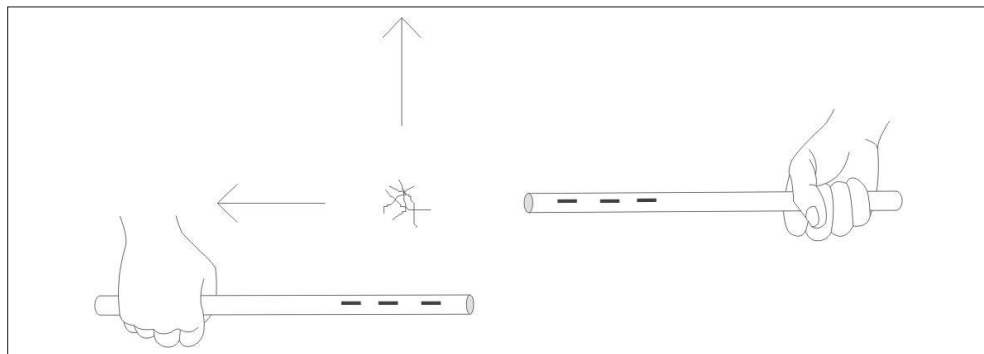



Figura 5.10. Le forze elettriche che agiscono su un pezzo di cotone negativamente carico.

### Esperimento 5.8

Ripetiamo l'Esperimento 5.7, facendo inizialmente fluttuare il fiocco negativo sopra una cannuccia di plastica caricata negativamente. Questa volta portiamo un bicchiere di vetro carico positivamente (cioè, precedentemente riscaldato e strofinato con un panno acrilico) a fianco del pezzo di ovatta. L'ovatta ora è attratta dal vetro e si muove verso di esso (Figura 5.11). È meglio effettuare un avvicinamento lento, evitando il contatto tra l'ovatta e il vetro, in modo da impedire all'ovatta di caricarsi mediante il meccanismo ACR, questa volta positivamente.

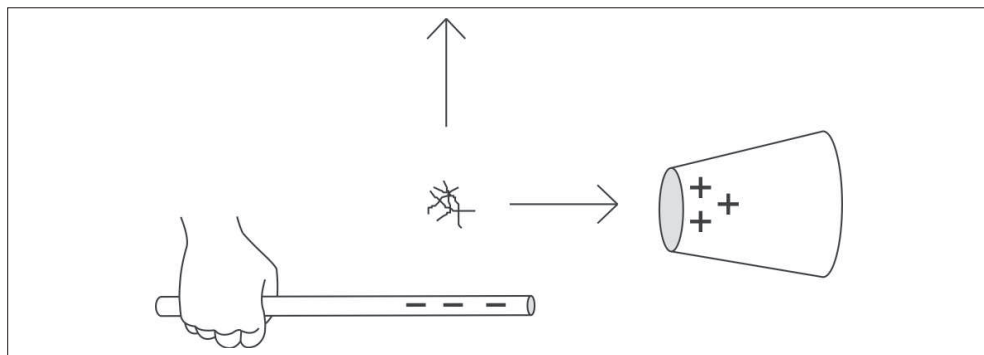



Figura 5.11. Un pezzo di cotone carico negativamente è attratto da un vetro carico positivamente.

### Esperimento 5.9

Ora usiamo un fiocco di ovatta, due panni in acrilico, una cannuccia di plastica e un bicchiere di vetro. Questo esperimento dovrebbe essere eseguito da due persone. Tuttavia, con un po' di pratica anche da una sola persona. La cannuccia e il bicchiere di vetro saranno strofinati con un panno acrilico.

Sappiamo che in questo caso la cannuccia diventerà negativa e il bicchiere positivo. Per creare una forte carica sul vetro è importante riscaldarlo prima dello sfregamento, come accennato in precedenza.

L'inizio di questa attività è identica all'Esperimento 4.4. Cioè, strofiniamo il bicchiere contro il tessuto acrilico e teniamo il bicchiere dal lato non strofinato. Rilasciato il fiocco sopra di esso, l'ovatta è attratta dalla porzione strofinata del bicchiere, la tocca, e le sue fibre poi si drizzano verso l'esterno. Talvolta l'ovatta salta via dal bicchiere dopo pochi secondi. Se questo non accade, possiamo ancora soffiare sull'ovatta leggermente fino a quando non viene lasciata libera dal bicchiere. Se poniamo il bicchiere al di sotto dell'ovatta, possiamo farla fluttuare sopra ad esso. A volte questo non avviene immediatamente, cosicché esso viene attratto una o più volte dal bicchiere fino a quando non acquisisce una carica sufficiente per essere fatto aleggiare sopra di esso. Più il vetro è elettrizzato, prima riuscirà a tenere in aria il fiocco di ovatta al di sopra di esso. Ciò ottenuto, supporremo che questa porzione di esperimento sia completata. In questo caso il bicchiere e l'ovatta aleggiante sopra di esso sono entrambi carichi positivamente (Figura 5.12 (a)).

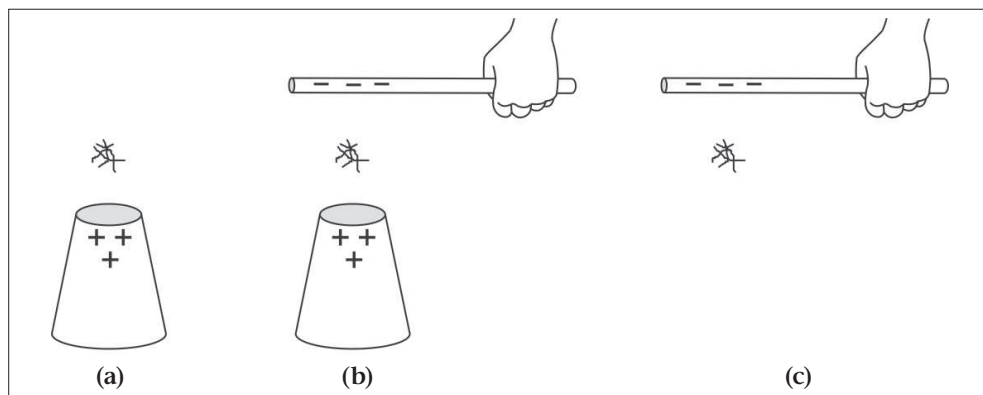



Figura 5.12. (**a**) Un fiocco di ovatta positiva può essere fatto fluttuare sopra un bicchiere positivo. (**b**) Esso può anche aleggiare tra un bicchiere positivo sotto e una cannuccia negativa sopra. (**c**) Possiamo togliere il vetro e tenere il fiocco in aria, sotto la cannuccia negativa.

Mentre l'ovatta fluttua sopra il bicchiere strofinato, piano piano portiamo una cannuccia di plastica carica negativamente in prossimità del cotone, avvicinandoci dall'alto. In questo caso si osserva che il cotone viene attratto dalla cannuccia, a differenza di quello che è successo nell'Esperimento 5.7. Idealmente l'ovatta non dovrebbe toccare la cannuccia di plastica. Cioè, ogni volta che il cotone si muove verso la cannuccia, la cannuccia dovrebbe esserne allontanata. Acquisendo pratica possiamo mantenere il cotone fluttuante tra il bicchiere sotto e la cannuccia sopra (Figura 5.12 (b)).

In questo caso è persino possibile rimuovere il vetro, cosicché il fiocco rimane fluttuante a causa solo dell'attrazione della cannuccia carica che sta sopra di esso! In questa situazione si ha l'opposto dell'Esperimento 4.4. Nell'Esperimento 4.4 il cotone negativo era fatto fluttuare dalla repulsione della cannuccia sottostante. Ora, invece, il cotone positivo continua ad aleggiare a causa dell'attrazione della cannuccia sopra di esso (Figura 5.12 (c)). Per far sì che il fiocco continui a fluttuare sotto la cannuccia è importante spostare la cannuccia costantemente; essa non può rimanere ferma rispetto alla Terra, in quanto questo è un equilibrio instabile. Quando la cannuccia è molto vicina all'ovatta, questa si muove velocemente verso di essa e le si attacca, facendo finire così l'esperimento. D'altra parte, se la cannuccia fosse a grande distanza al di sopra dell'ovatta, questa comincerebbe a precipitare verso terra. Inoltre, il il fiocco tende a spostarsi da una parte o dall'altra del piano verticale passante per la cannuccia. Di conseguenza, è necessario mantenere la cannuccia in costante movimento, in modo tale che il fiocco possa seguire il suo movimento, ma senza toccarla.

Quando l'ovatta tocca la cannuccia che sta sopra di essa, si attacca a questa. A volte essa cade dopo pochi secondi. Possiamo a questo punto tenerla in aria sopra la cannuccia, poiché ha di nuovo acquistato una carica con lo stesso segno della cannuccia. In altri casi essa si staccherà dalla cannuccia solo quando vi soffiamo sopra. Ad ogni modo, quando essa fluttua di nuovo sopra la cannuccia, possiamo invertire la situazione. Avvicinando dall'alto un bicchiere positivo verso il cotone negativo, il fiocco sarà fatto fluttuare tra i due corpi: la cannuccia negativa al di sotto e il bicchiere positivo sopra.

Nell'Esperimento 5.16 verrà mostrato come eseguire questo esperimento più facilmente utilizzando due cannucce di plastica elettrizzate.

## Esperimento 5.10

In questo esperimento abbiamo bisogno di due persone, una cannuccia di plastica, un bicchiere di vetro, due panni acrilici, due piccoli fiocchi di ovatta. Una persona strofina il bicchiere di vetro con un panno acrilico e quindi fa fluttuare un fiocco sopra di esso. In questo caso entrambi i corpi sono carichi positivamente (Figura 5.13 (a)). L'altra persona strofina la cannuccia con un panno acrilico e quindi tiene in fluttuazione l'altro fiocco sopra di essa. In questo caso, entrambi gli oggetti sono caricati negativamente (Figura 5.13 (b)).

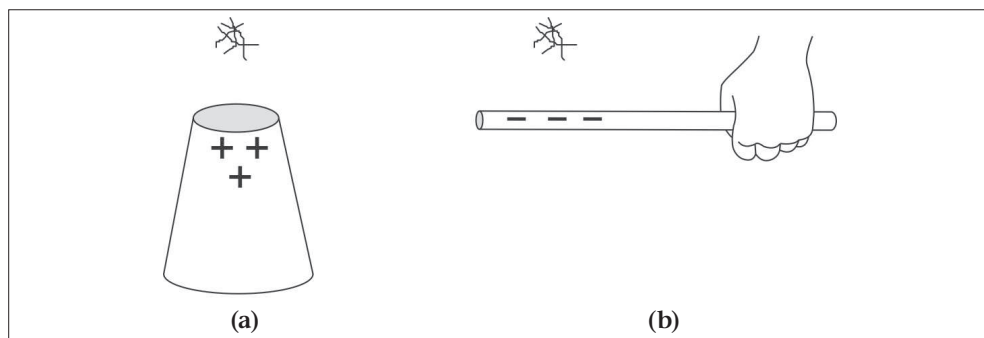



Figura 5.13. **(a)** Un fiocco di ovatta positivo fluttua sopra un bicchiere positivo. **(b)** Un fiocco di ovatta negativo fluttua sopra una plastica caricata negativamente.

Dopo di ciò, ogni persona cerca di dirigere il suo pezzo di cotone verso l'altro pezzo di cotone. E allora entrambi i pezzi di cotone si attraggono, si attaccano, e cadono a terra (Figura 5.14). Questo è il contrario di quanto accaduto nell'Esperimento 5.6.

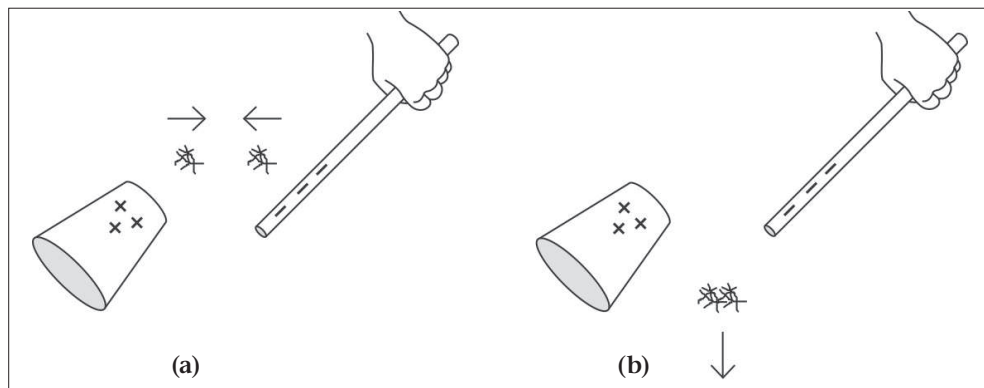



Figura 5.14 **(a)** Un fiocco positivo di ovatta è attratto da uno negativo. **(b)** Dopo essersi toccati, cadono insieme a terra.

## 5.2 Du Fay scopre due tipi di elettricità

Il primo a proporre l'esistenza di due tipi di elettricità fu Du Fay nel 1733, quando eseguì esperimenti simili a quelli appena presentati. Fino a quel tempo era noto che corpi elettrizzati attraevano corpi leggeri ed erano attratti da essi. Du Fay si era reso conto di un'altra regolarità, vale a dire la repulsione tra due corpi carichi. Questa era un'altra proprietà dei corpi carichi, come descritto nella Sezione 4.1. Egli aveva anche scoperto il meccanismo ACR, cioè, attrazione-contatto-repulsione. La sua scoperta di due tipi di elettricità fu completamente inaspettata. Questa gli si manfestò come conseguenza di un curioso risultato sperimentale che era totalmente contrario alle sue aspettative. Cominciò riproducendo gli esperimenti con una piuma fluttuante svolti da Guericke, Gray, e Hauksbee. Si veda l'Esperimento 4.4. Inizialmente elettrizzò un tubo di vetro per strofinio. Poi rilasciò foglioline d'oro piccole e sottili al di sopra del tubo strofinato. Esse furono attratte dal tubo, si attaccarono ad esso, e ne furono poi respinte. In questo modo cominciarono a fluttuare in aria sopra di esso. Ora citiamo le sue parole che descrivono il momento cruciale della sua grande scoperta (nostra enfasi in corsivo)[1]:

> [...] È quindi certo che i corpi che sono diventati elettrici mediante comunicazione [cioè attraverso il meccanismo ACR], vengono respinti da quelli che li hanno resi elettrici. Ma sono essi respinti allo stesso modo da ogni altro tipo di corpo elettrizzato? E i corpi elettrizzati non differiscono affatto l'uno dall'altro, salvo che per la loro intensità di elettrizzazione? *L'esame di questa materia mi ha portato ad una scoperta che non avrei mai potuto prevedere* e di cui credo che nessuno fino ad ora abbia avuto la più pallida idea.
> Ho iniziato a far volteggiare in aria con lo stesso tubo [di vetro elettrizzato] due foglie d'oro [elettrizzate attraverso il meccanismo ACR], ed esse sono sempre rimaste distanti l'una dall'altra, per quanti sforzi io abbia fatto per farle avvicinare, e ciò avrebbe dovuto verificarsi a causa del fatto che entrambe erano elettrizzate; ma non appena una delle due [foglie] ha toccato la mano o qualsiasi altro corpo, entrambe le foglie si sono attaccate l'una all'altra immediatamente, a causa del fatto che avendo perso la foglia [che aveva toccato la mano] la sua elettricità, l'altra [foglia elettrizzata] l'ha attratta e si è mossa verso di essa. [Appare un esempio di questo esperimento nella Figura 5.15.] Tutto que-

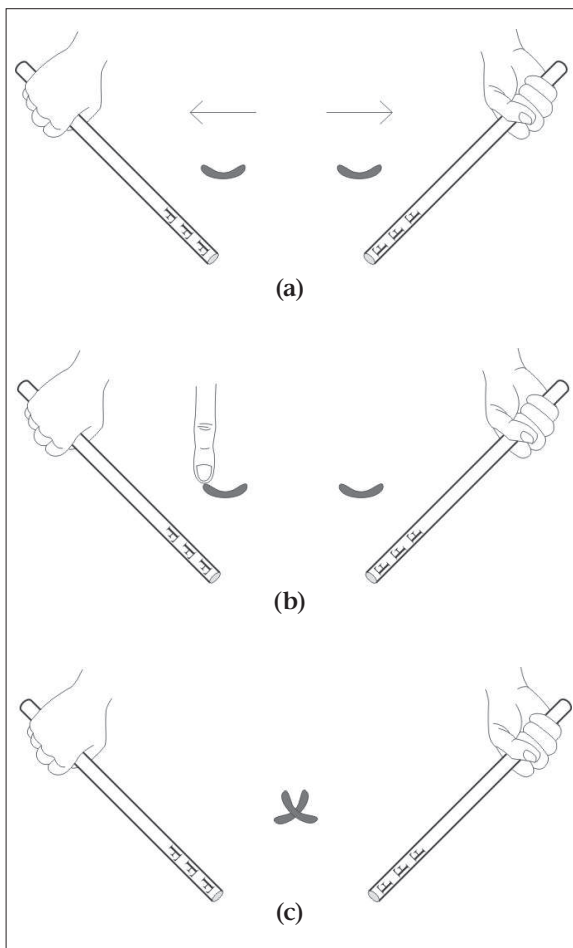



Figura 5.15. **(a)** Due foglie d'oro elettrizzate si respingono l'un l'altra e sono respinte dai tubi di vetro elettrizzati. **(b)** La mano tocca una delle foglie fluttuanti. **(c)** Dopo il contatto con la mano, le foglie si avvicinano reciprocamente.

sto era d'accordo con la mia ipotesi, *ma ciò che mi ha sconcertato in modo prodigioso*, è stato il seguente esperimento.

Dopo aver fatto aleggiare in aria una foglia d'oro mediante il tubo [di vetro elettrizzato], ho avvicinato la foglia con un pezzo di resina copale[2] strofinato ed elettrizzato e la foglia stessa si è attaccata immediatamente ad essa [cioè, la foglia d'oro è stata attratta dalla resina copale strofinata], e vi è rimasta. [Un esempio di questo esperimento appare in Figura 5.16.] *Confesso che mi aspettavo l'effetto completamente opposto*, dal momento che, secondo il mio ragionamento, il copale e la foglia d'oro, che sono entrambi elettrizzati, si sarebbero respinti a vicenda. [Cioè, Du Fay prevedeva una repulsione tra i due corpi elettrizzati, come aveva sempre osservato.] Ho ripetuto l'esperimento molte volte, ritenendo che non avessi rivolto la parte strofinata della barra [di copale] verso la foglia, la quale, di conseguenza, si avvicinava al copale come si sarebbe avvicinata al mio dito o a qualunque altro corpo [non elettrizzato]; ma, avendo fatto più prove per essere sicuro del risultato, mi sono del tutto convinto che era il copale ad attirare la foglia che il tubo [elettrizzato] respingeva. La stessa cosa è accaduta avvicinando alla foglia d'oro un pezzo di ambra [strofinato] o un pezzo di ceralacca strofinato.

Figura 5.16. **(a)** Una foglia d'oro elettrizzata fluttua sopra un vetro strofinato. **(b)** Un pezzo di resina copale strofinato si muove vicino alla foglia che aleggia. La foglia è attratta dal copale strofinato, con la freccia che indica questa nuova forza che agisce su di essa. **(c)** La foglia si muove verso il copale strofinato!

Dopo varie prove che non mi hanno per niente soddisfatto, ho avvicinato la foglia d'oro che era stata respinta dal tubo, con una sfera di cristallo di rocca strofinata ed elettrizzata ed essa [la sfera] ha respinto questa foglia come il tubo. Un altro tubo [di vetro elettrizzato] accostato alla foglia lo ha respinto allo stesso modo, finalmente, non potevo dubitare che il vetro e il cristallo di rocca avevano effetti contrari alla resina copale, l'ambra e la ceralacca, di modo che la foglia era respinta dal primo [gruppo strofinato], a causa della elettricità che aveva acquisito, ed attratta dal secondo [gruppo strofinato]; *questo mi ha fatto pensare che ci sono stati due diversi tipi di elettricità* ed ho avuto conferma di questa idea tramite i seguenti esperimenti.

Heilbron fornì un'altra traduzione inglese del paragrafo cruciale del lavoro di Du Fay citato prima, il paragrafo che contiene la parola *confessare*[3]:

Confesso che mi aspettavo un effetto completamente diverso, perché secondo il mio ragionamento il copale, essendo elettrico, avrebbe dovuto respingere la foglia, che era anche elettrica. Ho ripetuto l'esperimento molte volte, credendo che non avevo rivolto la parte strofinata della barra (verso la) alla foglia, che di conseguenza si è avvicinata al copale come sarebbe a qualsiasi corpo [non elettrizzato]; ma, dopo aver soddisfatto

me stesso completamente su quel risultato, ero del tutto convinto che il copale avrebbe attirato la foglia che il tubo respingeva.

Poiché la maggior parte dei materiali del primo gruppo che egli adoperò erano solidi e trasparenti come il vetro, egli chiamò il primo tipo di elettricità *elettricità vetrosa*. E a causa del fatto che la maggior parte dei materiali del secondo gruppo di cui si servì erano bituminose o resinose, chiamò questo secondo tipo di elettricità *elettricità resinosa*[4]:

> Abbiamo quindi due elettricità di natura completamente diversa, vale a dire, l'elettricità di corpi trasparenti e solidi, come il vetro, cristallo, ecc. e l'elettricità di corpi bituminosi e resinosi, come l'ambra, la resina copale, la ceralacca, ecc.. Entrambi i tipi respingono i corpi che acquisiscono elettricità della stessa natura della propria e, al contrario, attraggono i corpi aventi un'elettricità di una natura diversa dalla loro.
> [...]
> Pertanto, ci sono qui due elettricità ben dimostrate, e io non posso evitare di dare loro nomi diversi per evitare la confusione dei termini o il problema di definire in ogni momento l'elettricità che desidero menzionare. Per questo motivo, io chiamerò dunque l'una elettricità vetrosa, l'altra elettricità resinosa, non che io pensi che ci siano solo i corpi della natura del vetro ad essere dotati dell'una [specie di elettricità], e le materie resinose dell'altro [tipo di elettricità], poiché ho già molte prove del contrario [punto di vista], ma [scelgo queste denominazioni] perché il vetro e il copale sono state le due sostanze che mi hanno dato i collegamenti per scoprire le due elettricità differenti.

Du Fay non specificò quale materiale egli usò per strofinare il tubo di vetro e le altre sostanze. Probabilmente strofinò queste sostanze con un panno fatto di lana, seta o cotone.

In un lavoro di poco posteriore descrisse questa scoperta casuale con le seguenti parole[5]:

> La fortuna ha messo sulla mia strada un altro principio, più universale e notevole del precedente [il meccanismo ACR, si veda la Sezione 4.8], e che getta una nuova luce sul tema dell'elettricità. Questo principio è che ci sono due elettricità distinte, molto diverse l'una dall'altra; una delle quali io chiamo *elettricità vetrosa*, e l'altra *elettricità resinosa*. La prima [elettricità] è quella del vetro, cristallo di rocca, pietre preziose, peli degli animali, lana, e molti altri corpi [strofinati]. La seconda è quella dell'ambra, copale, ceralacca, seta, filo, carta, e un gran numero di altre sostanze [strofinate]. La caratteristica di queste due elettricità è che un corpo dall'*elettricità vetrosa*, per esempio, respinge tutti quelli che sono della stessa elettricità; e, al contrario, attrae tutti quelli dall'*elettricità resinosa*; tanto che il tubo [di vetro], reso elettrico [per sfregamento], respingerà vetro, cristallo, peli degli animali, ecc. quando resi elettrici [per sfregamento o attraverso il meccanismo ACR entrando in contatto con il tubo di vetro strofinato] e attirerà la seta, filo, carta, ecc. anche se resi elettrici allo stesso modo [per sfregamento o attraverso il meccanismo ACR entrando in contatto con una copale strofinata]. L'ambra [strofinata] al contrario attirerà il vetro elettrico, e le altre sostanze [elettrizzate] della stessa classe, e respingerà la gommalacca, copale, seta, filo, ecc. [strofinati]. Due nastri di seta resi elettrici [per sfregamento], si respingono l'un l'altro; due fili di lana [elettrizzati] faranno lo stesso; ma un filo di lana [strofinato] e un filo di seta [strofinato] saranno reciprocamente attratti l'uno dall'altro. Questo principio spiega in modo molto naturale, perché le estremità dei fili, di seta o di lana, si allontanano le une dalle altre nella forma di una matita o di una scopa, quando hanno acquisito una qualità elettrica. Da questa linea di principio si può con la stessa facilità dedurre la spiegazione di un gran numero di altri *fenomeni*. Ed è probabile, che questa verità ci porterà all'ulteriore scoperta di molte altre cose.

Come vedremo in seguito, non usiamo più la terminologia di Du Fay. Anziché dei termini elettricità vetrosa e resinosa utilizziamo rispettivamente *elettricità positive e ne-*

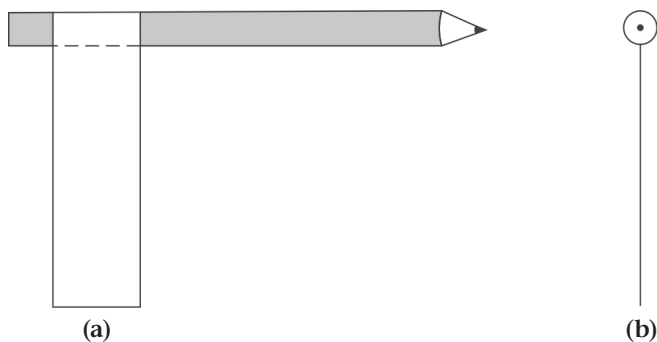
*gative*. Altre espressioni simili utilizzate al giorno d'oggi sono *cariche elettriche positive e negative*, o *corpi caricati positivamente e negativamente*. Nonostante questa diversa terminologia, il presupposto fondamentale di Du Fay circa l'esistenza di due tipi di elettricità è ancora accettato. Nella pratica moderna è anche ancora accettato che cariche dello stesso tipo si respingono, mentre cariche di diversi tipi si attraggono reciprocamente.

Un video molto interessante che mostra una riproduzione moderna dell'esperimento cruciale di Du Fay è stato realizzato da Blondel e Wolff[6], "La danse des feuilles d'or".

## 5.3 Quale tipo di carica un corpo acquisisce per strofinio?

Negli esperimenti del Capitolo 2 abbiamo analizzato quali materiali fossero o non fossero attratti da un oggetto strofinato. Abbiamo anche trovato materiali che, sfregati, avevano il potere di attrarre corpi leggeri. Qui varieremo in modo più sistematico i corpi con cui gli oggetti vengono strofinati.

Useremo uno strumento molto pratico fatto di una striscia di plastica sottile e flessibile attaccata ad un supporto orizzontale (una matita, una penna, uno spiedino, o una cannuccia). La striscia può essere, ad esempio, larga 5 cm e lunga 15 cm. Una sua estremità è attaccata ad una matita con nastro adesivo. La matita sia tenuta in orizzontale e la striscia in verticale. Nella Figura 5.17 vediamo uno strumento come questo, di profilo e di fronte. Per analogia con il filo pendulo di Gray della sezione 4.9, possiamo chiamare questo strumento *filo di plastica pendulo* o *striscia di plastica pendula*.

Figura 5.17. Una striscia di plastica sottile e flessibile attaccata ad una matita. **(a)** Vista laterale. **(b)** Vista frontale.

Si può costruire una serie di questi strumenti con della plastica presa dallo stesso materiale (per esempio, con tutte le strisce tagliate dal medesimo sacchetto di plastica). Dovremmo evitare di manipolare le strisce per impedire loro di caricarsi per strofinio. Prima di iniziare gli esperimenti con questi strumenti dovremmo controllare che essi siano veramente neutri. Per prima cosa scarichiamo un versorium di metallo toccandolo con il dito. Portiamo poi lentamente ogni striscia di plastica pendula nei pressi del versorium, senza lasciarli toccare. Se il versorium non si orienta verso la striscia, possiamo considerare neutra la plastica. Quando il versorium viene orientato dalla striscia, questa deve essere scartata e dovremmo costruire un altro strumento in sostituzione.

### Esperimento 5.11

Strofiniamo due di questi pezzi di plastica neutri con le dita, premendo la striscia tra indice e medio e poi spostando rapidamente le dita verso il basso lungo la plastica. Dopo di ciò, accostiamo una matita all'altra, in orizzontale. Le matite possono anche toccarsi. Osserviamo che le strisce si respingono a causa della reciproca repulsione. Se non ci fosse la repulsione rimarrebbero in verticale fianco a fianco. Questo è analogo all'Esperimento 4.1.

Ora prendiamo altre due strisce di plastica pendule neutre. Strofiniamole premendo ogni striscia tra due tubi neutri in PVC, ad esempio tubi di scarico dell'acqua. Per fare questo, per prima cosa controlliamo se questi tubi sono davvero neutri. Questo può essere fatto portando ogni tubo in prossimità di un versorium di metallo e facendo attenzione a che il versorium non sia orientato dal tubo in PVC. La sezione superiore della striscia di plastica sia ben compressa tra due di questi tubi in PVC neutri. Tiriamo poi la matita, con la sua striscia, rapidamente verso l'alto. Siamo in grado di verificare che la striscia è carica dopo questa procedura, portandola in prossimità di un versorium, che si orienta quindi verso la plastica strofinata. Questa procedura di sfregamento deve essere ripetuta con la seconda striscia di plastica pendula originariamente neutra. Ora avviciniamo queste due strisce che sono state strofinate coi tubi in PVC. Ancora una volta, esse si respingono.

C'è repulsione anche tra due strisce di plastica, inizialmente neutre, che sono state strofinate tra i capelli. Lo stesso accade per due strisce neutre dopo che sono state strofinate tra due tubi di gomma dura.

Questi quattro casi di repulsione sono rappresentati nella Figura 5.18.

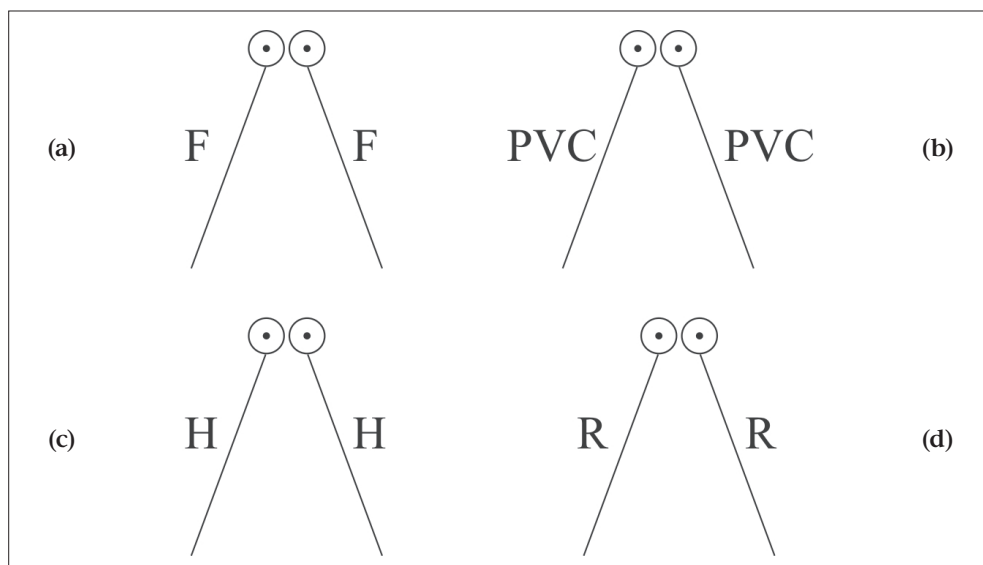



Figura 5.18. Repulsioni tra due strisce di plastica strofinate tra le dita (F), tra due tubi in PVC, nei capelli (H), o tra due tubi di gomma (R). Le lettere F, H e R vengono rispettivamente dalle parole inglesi "fingers", "hair" e "rubber hoses".

**Esperimento 5.12**

Ora prendiamo una delle strisce di plastica che sono state strofinate tra le dita. Portiamola vicina ad un'altra striscia di plastica che è stata strofinata coi tubi in PVC. Osserviamo che esse, tra loro, si attraggono.

Si osserva di nuovo un'attrazione quando portiamo una striscia di plastica strofinata tra le dita vicino ad un'altra striscia di plastica che è stata strofinata tra tubi di gomma. Lo stesso accade tra una plastica strofinata tra i capelli e una plastica che è stata strofinata tra i tubi in PVC; o tra una plastica che è stata strofinata tra i capelli e una plastica strofinata tra i tubi di gomma.

Questi quattro casi di attrazione sono rappresentati nella Figura 5.19.

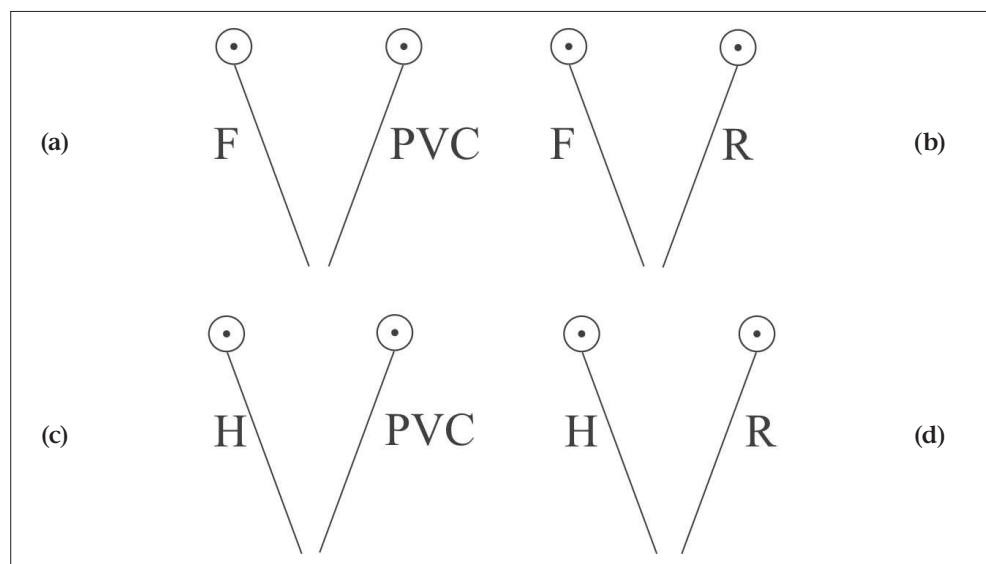



Figura 5.19. Quattro casi di attrazione tra due strisce di plastica strofinate con materiali diversi. **(a)** Dito e PVC. **(b)** Dito e gomma. **(c)** Capelli e PVC. **(d)** Capelli e gomma.

**Esperimento 5.13**

D'altra parte, vi è repulsione tra una plastica che è stata strofinata tra le nostre dita e un'altra plastica strofinata tra i capelli. Lo stesso accade tra una plastica strofinata tra i tubi in PVC e un'altra strofinata tra tubi di gomma (Figura 5.20).

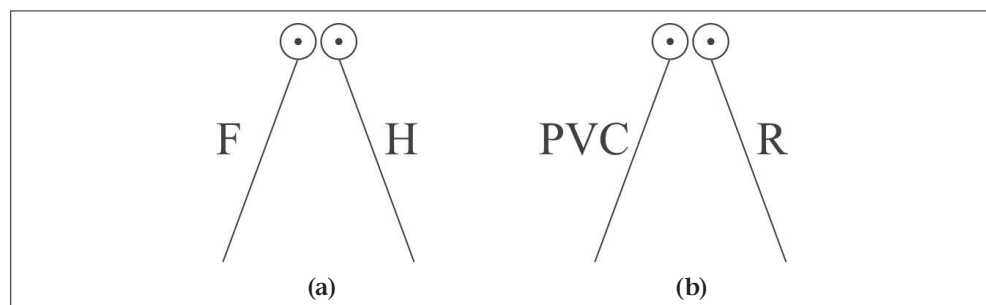



Figura 5.20. Repulsione tra due strisce di plastica sfregate con diverse sostanze. **(a)** Dita e capelli. **(b)** PVC e gomma.

Questi esperimenti dimostrano che un singolo materiale, nel nostro caso una striscia di plastica, può essere caricato sia negativamente che positivamente, a seconda del materiale con cui viene sfregato. Ciò sembra validare l'ipotesi di Du Fay sui due tipi di elettricità. D'altra parte, la sua supposizione che ciascun tipo di elettricità sia associata ad un gruppo specifico di materiali non è valida. Invece di parlare di elettricità vetrose e resinose, come suggerito da Du Fay, noi adottiamo la terminologia di *cariche positive e negative*. Nell'Esperimento 5.1 avevamo separato i corpi carichi in due gruppi distinti. Nel nostro esempio, il primo gruppo era composto da una cannuccia di plastica sfregata con un panno acrilico, un righello acrilico strofinato con un panno acrilico, un pendolo

caricato per contatto con la cannuccia di plastica strofinata e un pendolo caricato per contatto con il righello acrilico strofinato. Nel nostro esempio, il secondo gruppo era composto da un bicchiere di vetro strofinato con panno acrilico, una calza di seta sfregata con un panno acrilico, un pendolo caricato per contatto con questo vetro strofinato e un pendolo caricato per contatto con questa seta strofinata. Abbiamo visto che gli oggetti nel primo gruppo si respingevano tra loro, ugualmente facevano gli oggetti del secondo gruppo e un oggetto nel primo gruppo attraeva un oggetto nel secondo gruppo.

**Convenzione**: La convenzione ora è che gli oggetti del primo gruppo sono diventati *negativamente carichi*, o hanno acquisito *carica negativa*. Si dice inoltre che gli oggetti nel secondo gruppo sono diventati *positivamente carichi* o hanno acquisito *carica positiva*.

Lo stesso Du Fay cercò di determinare se il tipo di elettricità acquisita da un oggetto potesse dipendere dal materiale con cui veniva strofinato[7]. Per testare questa influenza egli strofinò un panno di seta riscaldato prima con le sue mani e poi con un altro panno di seta riscaldato. Egli verificò che la seta strofinata acquisiva la stessa elettricità resinosa in entrambi i casi. Inoltre strofinò lana e piume con le mani e con la seta. In entrambi i casi trovò che la lana e le piume acquisivano la stessa elettricità vetrosa. Dopo queste poche prove concluse che il materiale con cui strofiniamo un corpo poteva cambiare la quantità di elettrizzazione acquisita dal corpo, ma non il tipo di elettricità acquisita. In seguito questa conclusione ha dovuto essere modificata quando si è constatato che lo stesso corpo può acquisire entrambi i tipi di carica elettrica, a seconda del materiale con cui è stato strofinato. E quindi non ha più senso parlare di *elettricità vetrosa* o *elettricità resinosa*, poiché il vetro stesso, per esempio, può acquisire entrambi i tipi di elettricità, a seconda della sostanza con cui è strofinato.

**Definizioni**: Al giorno d'oggi si parla di *elettricità positiva e negativa* o di *cariche positive e negative*. Inoltre, è convenzionale chiamare la carica acquisita da una cannuccia di plastica strofinata tra i capelli, con la pelle, il cotone o la seta *negativa*. Allo stesso modo, la carica acquisita da una cannuccia di plastica sfregata con della gomma dura, un tubo in acrilico o PVC è chiamata *positiva*.

### Esperimento 5.14

Al fine di determinare quali cariche sono state acquisite dalla plastica strofinata nell'Esperimento 5.11, facciamo un esperimento che inizia in modo molto simile all'Esperimento 5.1. Un pendolo elettrico *I* è caricato negativamente attraverso il contatto con una cannuccia di plastica caricata per strofinio con un panno acrilico. Un pendolo elettrico *II* è caricato positivamente per contatto con una calza di seta caricata per strofinio con un panno acrilico. Poniamo questi due pendoli ad una buona distanza l'uno dall'altro. La cannuccia strofinata e la calza strofinata vengono tolte dal tavolo. I fili dei due pendoli carichi pendono verticalmente. Strofiniamo una striscia di plastica pendula con le nostre dita. Portiamo lentamente questa plastica strofinata vicino al pendolo *I*, non permettendo loro di toccarsi. Osserviamo che il pendolo è respinto dalla plastica (Figura 5.21 (a)). Dopo questa procedura, portiamo lentamente la stessa plastica strofinata vicino al pendolo *II*, non permettendo loro di toccarsi. Osserviamo ora un'attrazione (Figura 5.21 (b)). Concludiamo pertanto che la plastica da noi sfregata con le dita è diventata carica negativamente.

Ripetendo l'esperimento con altre strisce di plastica ciascuna strofinata con un diverso materiale, si osserva il seguente caricamento: tra le dita (negativamente), tra i tubi in PVC (positivamente), tra i capelli (negativamente), tra tubi di gomma dura (positivamente).

Questa è la procedura per determinare quale tipo di carica ha acquisito un corpo strofinato con un certo materiale. Essenzialmente, abbiamo bisogno di sapere in anticipo che un corpo *I* è carico negativamente e che un corpo *II* è carico positivamente. Por-

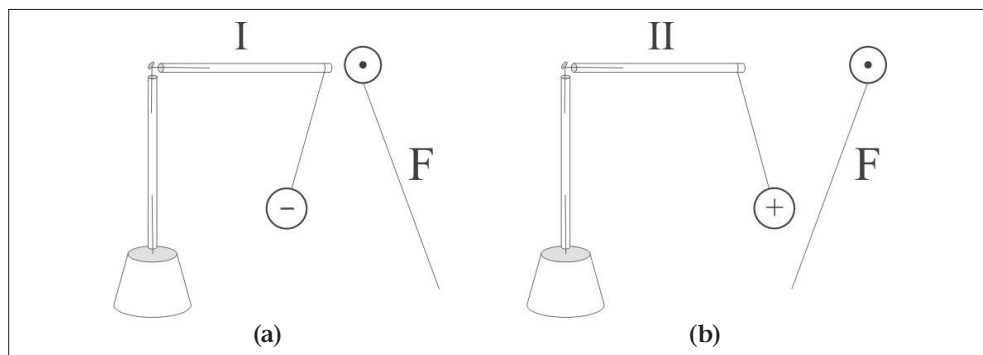



Figura 5.21. Procedura di Du Fay per scoprire il segno della carica di un corpo elettrizzato. In questo esempio la plastica strofinata viene respinta da un pendolo con carica negativa, (**a**), e viene attratta da un pendolo carico positivamente, (**b**). Quindi, possiamo concludere che la plastica è carica negativamente.

tiamo poi il corpo carico di prova vicino al corpo *I* e anche vicino al corpo *II*. Quando il corpo di prova viene respinto da *I* e attratto da *II*, si dice che ha una carica negativa. Quando è attratto da *I* e respinto da *II*, si dice che ha una carica positiva. Questa procedura è dovuta a Du Fay, anche se egli utilizzò i concetti di elettricità vetrose e resinose, invece dei nostri termini positivo e negativo[8]:

> Per valutare il tipo di elettricità di un corpo, è necessario soltanto elettrizzarlo e presentarlo ad un pezzo di vetro [elettrizzato] e poi ad un pezzo di ambra [elettrizzato]; [il corpo] sarà costantemente attratto da uno [dei pezzi] e respinto dall'altro [pezzo]; [...]

Eseguiremo questa procedura in modo più sistematico nella Sezione 5.4.

### Esperimento 5.15

Ora sappiamo che qualsiasi sostanza può essere caricata positivamente o negativamente, a seconda del materiale impiegato per strofinarla. Possiamo quindi ripetere l'Esperimento 5.1 in modo più pratico, ottenendo risultati più visibili.

*Una cannuccia di plastica acquisisce una buona quantità di carica negativa se strofinata tra i capelli, sulla pelle o con cotone. Per tentativi ed errori si è constatato che essa acquisisce una buona quantità di carica positiva strofinandola tra due tubi di gomma dura. Per caricare la cannuccia, tagliamo due pezzi di questo tipo di tubo. Poniamo un'estremità della cannuccia tra questi ultimi, facciamo sì che essi risultino ben compressi e tiriamola rapidamente fuori. Una cannuccia di plastica acquisisce anche una buona quantità di carica positiva strofinandola in questo modo tra due tubi in PVC.*

Carichiamo il disco di carta del pendolo *I* tramite il meccanismo ACR attraverso il contatto con una cannuccia di plastica strofinata con i capelli. Dopo il contatto, questo pendolo è respinto dalla cannuccia. Carichiamo il disco di carta del pendolo *II* per contatto con una cannuccia di plastica strofinata contro due tubi in gomma dura. Dopo il contatto, questo pendolo è respinto dalla cannuccia.

Comunque sia, quando portiamo lentamente quest'ultima cannuccia strofinata vicino al pendolo *I*, senza consentire il contatto, tra di loro ci sarà un'attrazione. Allo stesso modo, sempre senza permettere il contatto, ci sarà attrazione quando portiamo lentamente la prima cannuccia strofinata vicino a pendolo *II*.

Il vantaggio di questa procedura rispetto a quella adottata nell'Esperimento 5.1 è che è più facile e più pratico acquisire una buona quantità di carica positiva con una cannuccia di plastica strofinata tra due tubi in gomma dura, che con un bicchiere di vetro (o un panno di seta) strofinato contro un panno acrilico. In particolare, è difficile elettrizzare per strofinio i vetri moderni mentre li si tiene con la mano.

### Esperimento 5.16

L'Esperimento 5.9 può essere ripetuto più facilmente utilizzando due cannucce di plastica strofinate con materiali diversi (siccome lo stesso oggetto strofinato con materiali diversi acquisirà cariche diverse), invece di utilizzare una cannuccia e un bicchiere di vetro strofinati con lo stesso materiale. Usiamo anche un seme di dente di leone, o un fiocco d'ovatta che richieda circa 10 secondi per cadere da un'altezza di 2 metri. Strofiniamo una cannuccia tra i capelli per caricarla negativamente. Strofiniamo un'altra cannuccia contro due tubi di gomma dura per caricarla positivamente, come nell'Esperimento 5.15. Si tengano queste due cannucce orizzontalmente ma separate l'una dall'altra.

Il seme di dente di leone viene rilasciato sopra la cannuccia negativa. Esso è attratto dalla cannuccia, la tocca, ed è quindi respinto da essa (se non salta direttamente lontano dalla cannuccia, possiamo soffiare delicatamente su di esso). Il seme di dente di leone acquisisce una carica negativa attraverso il meccanismo ACR. Esso può quindi essere fatto fluttuare sopra la cannuccia, come nell'Esperimento 4.4 (Figura 5.22 (a)).

Ora portiamo lentamente la cannuccia positiva sopra il seme di dente di leone. La seconda cannuccia deve sempre rimanere al di sopra del seme, senza toccarlo.

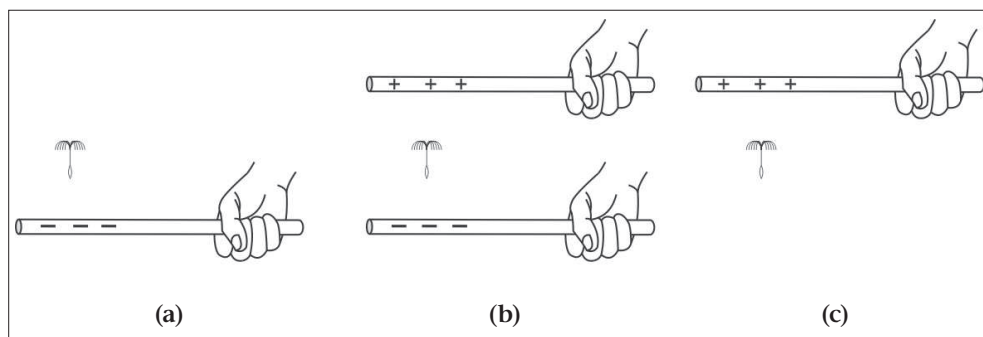



Figura 5.22. **(a)** Un seme di dente di leone negativo che fluttua sopra una cannuccia negativa. **(b)** Il seme di dente di leone negativo sospeso tra una cannuccia negativa ed una positiva. (C) Il seme di dente di leone negativo che fluttua sotto una cannuccia positiva.

In questo caso ci sarà un'attrazione tra il seme di dente di leone negativo e la seconda cannuccia positiva. Si può far levitare il seme di dente di leone negativo tra la cannuccia negativa inferiore e la cannuccia positiva superiore, come in Figura 5.22 (b). Questo può essere ottenuto solo evitando il contatto tra il seme di dente di leone negativo e la cannuccia positiva sopra di esso.

È possibile rimuovere la cannuccia inferiore negativa e mantenere il seme di dente di leone negativo fluttuante in aria al di sotto della cannuccia positiva, a condizione che non si tocchino (Figura 5.22 (c)). Con la pratica si acquisisce un buon controllo di questo esperimento. Ogni volta che il seme di dente di leone negativo si muove verso la cannuccia positiva superiore, si deve allontanare la cannuccia in fretta, ma mantenendola sempre sopra il seme di dente di leone. In questo modo il seme di dente di leone può essere sospeso in aria sotto la cannuccia, mentre oscilla su e giù.

### Esperimento 5.17

L'Esperimento 5.15 può anche essere eseguito utilizzando il versorium di Du Fay, visto in Sezione 4.7. Costruiamo due di questi versorium, li chiameremo *I* e *II*, sempre controllando se sono veramente scarichi dopo averli costruiti. Ricordiamo di avvolgere un piccolo pezzo di alluminio, ritagliato da un comune foglio di alluminio per alimenti, alla fine di una gamba di ogni versorium di Du Fay.

Inizialmente strofiniamo una cannuccia di plastica nei capelli per caricarla negativamente. Carichiamo poi il versorium *I* attraverso il meccanismo ACR, come descritto nell'Esperimento 4.12. Dopo che l'alluminio viene rilasciato dalla cannuccia negativa, esso ne viene respinto. Strofiniamo un'altra cannuccia tra due tubi in gomma dura per caricarla positivamente. Carichiamo ora il versorium *II* positivamente, tramite il contatto con questa cannuccia. Dopo che l'alluminio ha rilasciato la cannuccia positiva, esso ne viene respinto.

Ora portiamo lentamente la cannuccia negativa nei pressi del versorium *II*, non permettendo loro di toccarsi. Osserviamo che l'alluminio è attratto dalla cannuccia. Portiamo lentamente la cannuccia positiva nei pressi del versorium *I*, non permettendo loro di toccarsi. Osserviamo che il foglio di alluminio è attratto da questa cannuccia anche nel secondo caso.

### Esperimento 5.18

L'Esperimento 5.14 può essere eseguito anche con due versorium di Du Fay. Il foglio di alluminio del versorium *I* è caricato negativamente attraverso il meccanismo ACR, come nell'Esperimento 5.17. Con la stessa procedura, il foglio di alluminio del versorium *II* è caricato positivamente. Un'altra cannuccia di plastica viene strofinata contro un certo materiale. Dopo questa procedura, portiamo la parte strofinata di questa cannuccia vicino al versorium negativo *I*, non permettendo ai due di toccarsi. Supponiamo che essi si respingano, come in Figura 5.23.

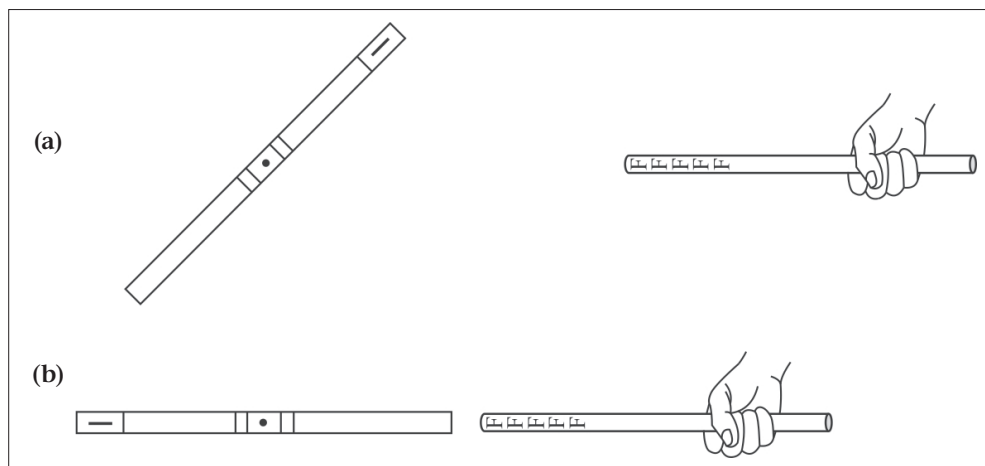



Figura 5.23. Foglio di alluminio di un versorium di Du Fay caricato negativamente, respinto da un corpo elettrizzato che si avvicina ad esso.

Passiamo ora la parte strofinata di questa cannuccia vicino al versorium positivo *II*, non permettendo loro di toccarsi. Supponiamo che si attraggano, come in Figura 5.24. Siccome cariche uguali si respingono a vicenda, e cariche opposte si attraggono, in questo caso si può concludere che, nel precedente strofinio, la cannuccia è diventata negativa. La stessa procedura può essere utilizzata per determinare il segno della carica su altri materiali elettrizzati per strofinio con materiali diversi.

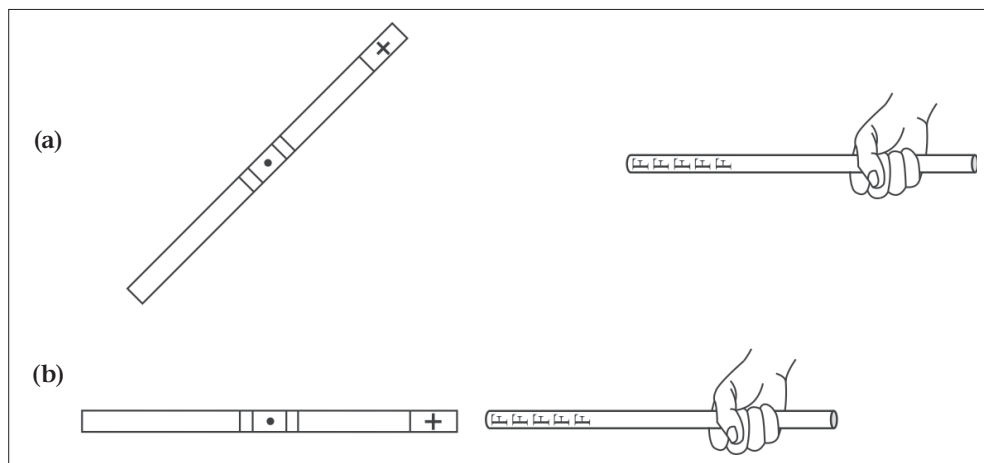



Figura 5.24. L'alluminio di un versorium di Du Fay caricato positivamente, attratto da un corpo elettrizzato che è stato avvicinato ad esso.

Du Fay creò questo tipo di versorium come strumento pratico e sensibile per determinare il tipo di elettricità acquisita dagli oggetti che assumono pochissima elettricità. Inizialmente costruì un versorium di metallo, ma più tardi si accorse che, per i suoi scopi, sarebbe stato meglio avere versorium di vetro o cera. Allora lui descrisse un esperimento analogo all'Esperimento 5.18[9]:

> C'è ancora un altro modo molto semplice per conoscere il tipo di elettricità di un corpo per il quale questa virtù è molto debole [...] Per il momento eviterò [di presentare] al lettore i faticosi e scoraggianti dettagli degli esperimenti difettosi o imperfetti e dirò solo che per avere successo, è necessario utilizzare un ago di vetro [un versorium fatto di vetro] posto sopra un lungo perno di vetro, questo ago deve avere in una delle sue estremità una sfera metallica cava, e nell'altra [estremità] un contrappeso di vetro, è necessario asciugare tutte le sue parti e quindi è necessario comunicare l'elettricità alla sfera di metallo con un tubo [di vetro strofinato], o di qualsiasi analoga materia, la sfera [carica] sarà poi attratta da corpi che hanno un'elettricità resinosa e sarà respinta dai corpi che hanno un'elettricità vetrosa.

## 5.4 La serie triboelettrica

In questo esperimento illustriamo come la procedura pratica dell'Esperimento 5.14 possa essere utilizzata con una vasta gamma di sostanze strofinate contro diversi materiali. Sarà utilizzato un versorium di metallo per verificare se il corpo è neutro o carico. Inizialmente tocchiamo il versorium con il nostro dito, in modo da scaricarlo. Avviciniamo poi lentamente il corpo al versorium, senza toccarlo. Quando il versorium rimane in quiete, senza essere orientato verso il corpo, diciamo che il corpo è neutro. Quando il versorium viene orientato verso il corpo, diciamo che il corpo è carico.

Al fine di testare la carica acquisita da corpi strofinati, utilizziamo due pendoli elettrici caricati con elettricità opposte. Questi due pendoli sono tenuti sul tavolo, ad una buona distanza l'uno dall'altro. Prima di caricare i pendoli tocchiamo il disco di carta di ognuno di loro con il nostro dito. Carichiamoli poi per contatto. Una procedura semplice ed efficace è quella di strofinare una cannuccia di plastica ed avvicinarla ad uno dei pendoli. Il disco di carta è attratto dalla cannuccia strofinata, la tocca, e ne è quindi respinto, perché acquisisce una carica dello stesso segno.

Dalla nostra esperienza con questo tipo di esperimento, sappiamo che è facile caricare un pendolo negativamente. Dopotutto, una cannuccia di plastica acquisisce una grande quantità di carica negativa quando è strofinata contro diversi materiali: capelli, cotone, carta, ecc. Ci sono anche altri corpi che acquistano una buona quantità di elettricità negativa (il materiale con cui vengono strofinati è quello che di seguito viene indicato tra parentesi): tubo acrilico (foglio di carta, cotone, tessuto acrilico, capelli, poliammide sintetico), tubo in gomma dura (sacchetto di plastica, stoffa acrilica, poliammide sintetico, capelli, vetro), tubo in PVC (pelle umana, stoffa acrilica, poliammide sintetico, vetro), polistirolo (capelli), sacchetto di plastica (capelli), e seta (capelli).

È più difficile trovare materiali appropriati che acquisiscano una grande quantità di elettricità positiva per strofinio. Per poter caricare una cannuccia di plastica con una grande quantità di carica positiva abbiamo dovuto strofinarla contro due tubi in gomma dura (o contro due tubi in PVC), tirandola velocemente tra i tubi compressi. Vi sono altri oggetti che acquisiscono una buona quantità di carica positiva (il materiale con cui vengono strofinati è quello che di seguito viene indicato tra parentesi): vetro (panno acrilico), poliammide sintetico (tessuto acrilico), e seta (tessuto acrilico, tubi in gomma dura, tubi acrilici, e tubi in PVC).

Per caricare alcuni materiali aventi la forma di filo o di cavo (capelli, filo di cotone, filo di poliammide sintetico e filo di poliestere) abbiamo utilizzato la seguente procedura. Inizialmente, essi sono stati legati a una cannuccia di plastica per evitare di essere scaricati attraverso la nostra mano dopo lo sfregamento (Figura 5.25 (a)). Per verificare la carica acquisita da questi fili strofinati non abbiamo impiegato i pendoli carichi descritti in precedenza. Abbiamo usato, invece, adeguati supporti per sostenere una cannuccia carica negativamente (strofinata tra i capelli lungo la sua intera lunghezza) e una cannuccia carica positivamente (strofinata tra due tubi in gomma dura lungo tutta la sua lunghezza). Il supporto può essere identico a quello del pendolo di Figura 5.25 (b).

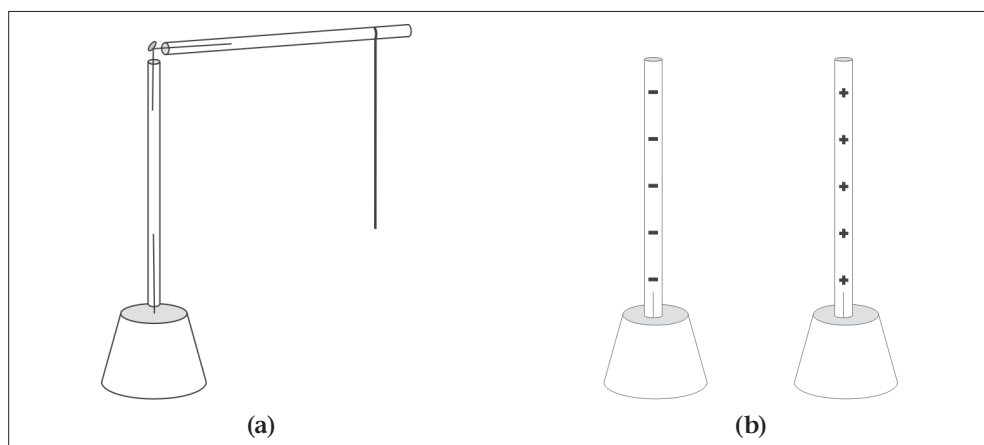



Figura 5.25. **(a)** Filo legato ad una cannuccia di plastica. **(b)** Cannucce di plastica elettrizzate in modo opposto.

Il filo strofinato, legato ad una cannuccia orizzontale, è stato poi spostato lentamente vicino alla cannuccia verticale caricata negativamente, senza toccarla. Successivamente esso è stato lentamente spostato vicino alla cannuccia verticale carica positivamente, senza toccarla. Osservando l'attrazione e la repulsione di questo filo in relazione a tali cannucce cariche, possiamo determinarne la carica acquisita per strofinio.

Gli oggetti testati sono stati i seguenti: pelle umana secca, sacchetto di plastica, carta velina, polistirolo, foglio di alluminio, cotone, panno di acrilico (vedi Esperimento 5.1),

poliammide sintetica, capelli, cuoio, lana d'acciaio, sughero, vetro liscio, tubo di gomma dura, cannuccia di plastica per bere, ceramica, tubo acrilico, tubo in PVC, cartoncino, legno, e seta. Abbiamo strofinato alcuni materiali con cotone idrofilo (ovatta), o strofinato un filo di cotone contro altri corpi. La poliammide sintetica di una calza da donna è stata utilizzata per strofinare alcuni materiali. Alcune calze cosiddette "di seta" sono in effetti fatte di poliammide sintetica. La poliammide sintetica è anche facilmente reperibile nei costumi da bagno. Abbiamo strofinato diversi oggetti contro i nostri capelli, ma abbiamo anche utilizzato un singolo capello umano legato ad una cannuccia di plastica e lo abbiamo strofinato contro altri materiali. Il legno utilizzato nei nostri esperimenti è stato ottenuto da spiedini per barbecue venduti nei negozi. Non conosciamo da quale tipo di albero questo legno sia stato ottenuto. Abbiamo usato un panno di seta per strofinare alcuni materiali. Abbiamo anche utilizzato un filo di seta, che è stato strofinato contro altri oggetti. Il vetro utilizzato per questi esperimenti era molto liscio.

La procedura adottata nella maggior parte dei casi è stata la seguente. Un pendolo veniva caricato negativamente toccandolo con una cannuccia strofinata tra i capelli. Un altro pendolo veniva caricato positivamente tramite il contatto con una cannuccia strofinata contro due tubi di gomma dura. Questi pendoli carichi erano messi lontani l'uno dall'altro, quanto basta perché i loro fili pendessero verticalmente. Anche le cannucce strofinate erano separate spazialmente e poste verticalmente su appositi supporti, per testare la carica acquisita da alcuni fili strofinati.

Per prima cosa abbiamo voluto verificare se alcuni oggetti, diciamoli *I* e *II*, fossero inizialmente scarichi spostando ciascuno di essi in prossimità di un versorium. Ciò visto, l'oggetto *I* sarebbe poi stato strofinato contro oggetto *II*. L'idea era che si potesse variare sia l'oggetto *I* che il *II* per determinare quale carica veniva prodotta.

Dopo aver fatto questo, abbiamo controllato se l'oggetto *I* aveva ricevuto abbastanza carica. A tal fine, l'abbiamo lentamente portato in prossimità del versorium, per vedere se il versorium ne veniva orientato. In caso affermativo, l'oggetto carico *I* sarebbe stato avvicinato lentamente al pendolo caricato negativamente, senza contatto, per constatare se quest'ultimo ne era attratto o respinto. L'oggetto *I* era poi piano piano spostato vicino al pendolo caricato positivamente, senza contatto. Si osservava se questo secondo pendolo era attratto o respinto dall'oggetto *I*. Se c'era attrazione (repulsione) del pendolo con carica negativa e anche repulsione (attrazione) del pendolo con carica positiva, avremmo concluso che l'oggetto *I* era diventato positivamente (negativamente) carico essendo stato strofinato contro l'oggetto *II*.

Ci sembra rilevante verificare se uno dei pendoli sia attratto o respinto dall'oggetto carico e se ciò accada ugualmente con l'altro pendolo, sempre con lo stesso oggetto. Tale accorgimento è necessario per evitare qualsiasi dubbio circa la carica acquisita dall'oggetto strofinato. La ragione di tale precauzione è che la carica acquisita per strofinio può essere spesso molto piccola. Ciò crea attrazioni e repulsioni di piccole intensità fra l'oggetto strofinato e i pendoli carichi, facendo sì che sia difficile eseguire precise osservazioni.

Di tanto in tanto si dovrebbe toccare il versorium con un dito, per scaricare l'elettricità residua che esso potrebbe aver acquisito. Inoltre, di tanto in tanto si dovrebbe anche caricare di nuovo ogni pendolo, poiché la loro elettricità diminuisce con il passare del tempo. Per quanto riguarda gli oggetti plastici o resinosi, non dobbiamo strofinare lo stesso oggetto con più di una sostanza. La ragione di questa precauzione è che a volte la carica acquisita durante la prima frizione permane nella plastica o nel corpo resinoso. Questo rende difficile sapere con chiarezza quale tipo di elettricità è stata acquisita per strofinio con la seconda sostanza. Al fine di testare la carica acquisita da una cannuccia di plastica, per esempio, si dovrebbe far ricorso ad una nuova cannuccia ogni volta che si cambia la sostanza che le si strofina contro. Inoltre, prima di strofinare la cannuccia, è sempre opportuno verificare se è veramente neutra.

Quando si è trattato di strofinare la cannuccia di plastica con materiali duri, abbiamo infilato in precedenza una delle sue estremità tra due pezzi di ciascuno di tali materiali (cioè tra due pezzi di polistirolo, tra due tappi e così via). Ciò fatto, abbiamo poi estratto via la cannuccia, in fretta, attenti a farla passare completamente attraverso questi due oggetti, sì che essa venisse sfregata per tutta la sua lunghezza.

Nel caso del vetro, cuoio, porcellana, legno e carta abbiamo bisogno di attenzioni particolari prima di manipolarli. Essi possono acquisire e mantenere una buona quantità di carica solo se, prima dello sfregamento, sono stati essiccati e, preferibilmente, riscaldati. Noi li abbiamo riscaldati in un forno a microonde, ma è anche possibile riscaldarli con un fiammifero.

In genere abbiamo strofinato il corpo *I* contro il corpo *II*. Quando è stato possibile abbiamo testato entrambe le cariche, la carica sul corpo *I* e la carica sul corpo *II*. Ma ciò non sempre è stato possibile. In alcuni casi, uno di questi corpi non ha mantenuto alcuna carica dopo lo strofinio. Normalmente questo corpo perde la sua carica a causa del contatto con la nostra mano, come nel caso della lana d'acciaio, del cotone o di un foglio di carta. Quando ciò è capitato, abbiamo testato solo la carica mantenuta dall'altro corpo.

Dopo aver seguito queste procedure ed effettuato gli esperimenti, abbiamo compilato una classifica dell'elettrizzazione riscontrata, disponendo i risultati in ordine dal positivo al negativo, come è mostrata nella Tabella 5.1.

| + |
|---|
| capelli |
| vetro liscio |
| pelle umana |
| poliammide sintetica |
| cotone |
| seta |
| carta o cartoncino |
| cuoio |
| porcellana |
| foglio di alluminio |
| legno |
| sughero |
| panno acrilico |
| polistirolo |
| sacchetto di plastica |
| cannuccia di plastica per bere |
| acrilico rigido |
| tubo in PVC |
| gomma dura |
| – |

Tabella 5.1. Serie triboelettrica.

**Definizione**: una lista come la Tabella 5.1 si chiama *serie triboelettrica*. Il prefisso “tribo” deriva dal greco. Il suo significato è lo strofinio o l’atto dello sfregamento. Una serie triboelettrica indica i tipi di elettrizzazione ottenuti per strofinio.

Questa Tabella deve essere letta come segue: quando strofiniamo il corpo *I* contro il corpo *II*, il corpo che si carica positivamente è posto più in alto dell’altro. Cioè, il corpo che è più vicino al simbolo + diventerà carico positivamente, mentre l’altro diventerà carico negativamente. Per esempio, quando la cannuccia viene strofinata nella seta, la seta diventerà positiva e la plastica negativa.

In questa Tabella non abbiamo incluso la lana d’acciaio perché qualsiasi corpo difficilmente acquisiva una forte carica elettrica mediante lo strofinio con essa. I corpi diventati negativi sono stati la cannuccia di plastica, il tubo acrilico, la gomma dura, il tubo di PVC, il polistirolo e il sacchetto di plastica. Un singolo capello umano, al contrario, è diventato positivo, strofinandolo con la lana d’acciaio. Il vetro, il legno, la porcellana, il panno acrilico, la poliammide sintetica e la seta non hanno acquistato una quantità di carica percepibile.

Questa serie triboelettrica non coincide con altre serie triboelettriche trovate in letteratura. È anche comune trovare due o più serie triboelettriche che sono diverse tra loro, anche includendo gli stessi corpi in ordine diverso. Ci sono buone ragioni per questa divergenza di risultati.

Ci sono molti tipi di vetro differenti l’uno dall’altro, realizzati con materiali diversi e frutto di varie procedure di fabbricazione. Questi aspetti certamente influenzano la loro capacità di acquisire cariche positive o negative per strofinio. Per esempio, alcuni tipi di vetro diventano carichi positivamente dopo essere strofinati nella nostra mano, mentre altri tipi di vetro diventano carichi negativamente. La stessa varietà di materiali e le procedure di fabbricazione si riscontra con altre sostanze (plastica, carta, gomma, ecc.). Il colorante usato per la seta e per altri tessuti o fili può a sua volta influenzare le loro proprietà. Il legno di alberi diversi può avere differenti proprietà. I capelli e la pelle umana possono essere più o meno grassi, possono anche essere impregnati di shampoo, creme e altre sostanze.

Chiunque esegua questi esperimenti dovrebbe cercare di costruire una propria serie triboelettrica, utilizzando i materiali a sua disposizione.

Nella Sezione 5.3 abbiamo visto che, nel 1733, Du Fay aveva strofinato seta, piume, e lana con la seta e con la sua mano. Egli trovò che ciascuno di questi corpi si caricava sempre di elettricità dello stesso tipo, indipendentemente dal materiale con il quale veniva strofinato. Da allora sono state rilevate alcune anomalie. John Canton (1712-1772), in particolare, scoprì che il vetro ruvido (non lucidato) può essere caricato positivamente strofinandolo con la flanella o negativamente strofinandolo con la seta oleata[10]. Queste ricerche sono state continuate da Johan Carl Wilcke (1732-1796), che nel 1757 pubblicò la prima serie triboelettrica, vale a dire[11]: vetro liscio, lana, penne, legno, carta, ceralacca, cera bianca, vetro grezzo, piombo, zolfo, e metalli diversi dal piombo. Nel 1759 Benjamin Wilson (1721-1788) pubblicò un’altra serie, forse ottenuta indipendentemente da Wilcke, cioè[12]: diamante, tormalina, vetro, ambra. Queste sono state le prime serie triboelettriche mai pubblicate.

## 5.5 Le attrazioni e le repulsioni sono ugualmente frequenti?

### Esperimento 5.19

Nella Sezione 5.4 abbiamo visto come caricare una cannuccia di plastica positivamente e negativamente. Carichiamo una di queste cannucce negativamente per strofinio e ripetiamo l’Esperimento 4.10. Cioè, inizialmente tocchiamo il disco di carta del pendolo con il nostro dito. Quindi spostiamo la cannuccia negativa vicino al pendolo. Il disco di carta è attratto dalla cannuccia, la tocca, e poi viene respinto da essa. Quando tocchiamo il disco di carta con il nostro dito, esso si scarica. Possiamo quindi ripetere l’intera procedura.

Lo stesso esperimento deve essere fatto con una cannuccia carica positivamente. All'inizio scarichiamo il pendolo quando tocchiamo il disco di carta con il nostro dito. Quando avviciniamo la cannuccia positiva al disco, quest'ultimo è attratto dalla cannuccia, la tocca, e viene quindi respinto. Quando tocchiamo il disco di carta, esso si scarica. L'intera procedura può essere ripetuta.

### Esperimento 5.20

Ora eseguiamo esperimenti analoghi agli Esperimenti 5.1 e 5.15. Carichiamo il pendolo *I* negativamente con il metodo ACR, come negli Esperimenti 4.7 e 5.19. Carichiamo il pendolo *II* positivamente con il metodo ACR, come nell'Esperimento 5.20. Portiamo lentamente la cannuccia negativa vicino al pendolo con carica negativa *I* e osserviamo la repulsione del pendolo. Passiamo ora la cannuccia negativa vicino al pendolo *II* carico positivamente, senza farli toccare. Osserviamo l'attrazione del pendolo. Portiamo lentamente la cannuccia positiva vicino al pendolo *II* positivamente carico e osserviamo che il pendolo è respinto. Passiamo ora la cannuccia positiva nei pressi del pendolo *I* carico negativamente, senza farli toccare. Il pendolo ne viene attratto.

### Esperimento 5.21

Ora eseguiamo esperimenti analoghi all'Esperimento 4.8. Un pendolo viene caricato negativamente con il metodo ACR. Per far ciò, viene avvicinata al pendolo una cannuccia strofinata tra i capelli, come negli Esperimenti 5.1 e 5.15. Dopo che il disco di carta ne è respinto, togliamo la cannuccia. Ora portiamo lentamente il nostro dito vicino al disco di carta, senza farli toccare. Il pendolo è attratto dal dito.

La stessa procedura viene ripetuta con un pendolo carico positivamente. Una carica positiva può essere ottenuta quando portiamo una cannuccia strofinata tra due tubi in gomma dura vicino a un pendolo neutro. Dopo che il disco di carta viene respinto da questa cannuccia strofinata, togliamo la cannuccia. Ora portiamo lentamente il nostro dito vicino al pendolo, senza farli toccare. Ancora una volta il pendolo è attratto dal dito.

L'Esperimento 5.20 mostra ancora che un corpo *I* caricato negativamente respinge un altro corpo *II* caricato negativamente. Lo stesso accade per due corpi caricati positivamente. D'altra parte, se il corpo *I* è caricato negativamente e il corpo *II* è caricato positivamente, essi si attraggono. Lo stesso accade se *I* è positivo e *II* negativo.

Vediamo così due attrazioni e due repulsioni. Ciò potrebbe indicare che questi due fenomeni sono ugualmente frequenti. Tuttavia, come visto negli Esperimenti 5.19 e 5.21, un corpo carico attira normalmente un corpo neutro, sia se il corpo carico è positivo, sia se è negativo. E un corpo neutro come il nostro dito attrae non solo un corpo positivo, ma anche uno negativo. Questo mostra che le attrazioni sono molto più frequenti e comuni delle repulsioni, a causa del fatto che la maggior parte dei corpi sono macroscopicamente neutri. Quando carichiamo un certo corpo, esso tenderà ad attrarre quasi tutti i corpi attorno ad esso, sebbene possa accadere che questa attrazione sia di intensità molto bassa, difficile da rilevare o da osservare. Questo corpo caricato tenterà di respingere solo gli altri corpi che hanno una carica totale dello stesso segno. Se il secondo corpo ha una carica di segno opposto al primo, o se il secondo corpo è neutro, fra loro ci sarà attrazione.

In conclusione si può affermare che questi esperimenti illustrano il fatto che le attrazioni elettriche sono molto più comuni di quanto lo siano le repulsioni elettriche, in quanto si verificano molto più frequentemente.

Nella sezione 7.10 si discuterà la forza dell'interazione tra due corpi elettrizzati con cariche dello stesso segno.

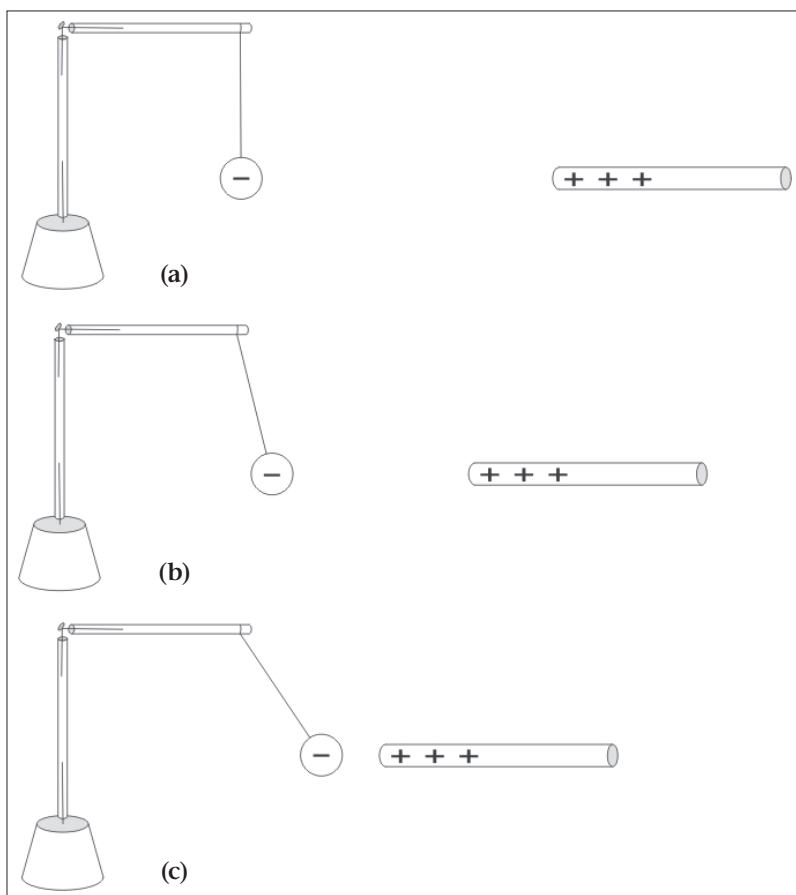
### 5.6 Variazione della forza elettrica in funzione della distanza

Fin dal più antico esperimento di elettrostatica, l'Esperimento 2.1, è noto che l'attrazione esercitata da un corpo carico su di un piccolo corpo leggero dipende dalla loro distanza. Infatti, corpi leggeri sono attratti visibilmente da un corpo strofinato solo quando la distanza tra loro è piccola. Quando la distanza tra questi due corpi è molto grande, tale attrazione non è facile da rilevare. Lo stesso accade con gli esperimenti col versorium, come l'Esperimento 3.1. Infatti, solo quando è portata vicino al versorium, la plastica strofinata fa orientare il versorium verso di essa. Lo stesso accade con tutti gli altri esperimenti descritti finora, visto che gli effetti avvengono solo quando vi è una piccola distanza tra i corpi interagenti.

Questi effetti possono essere osservati anche nelle attrazioni e repulsioni tra corpi carichi. Illustriamo questo fatto con un pendolo elettrico.

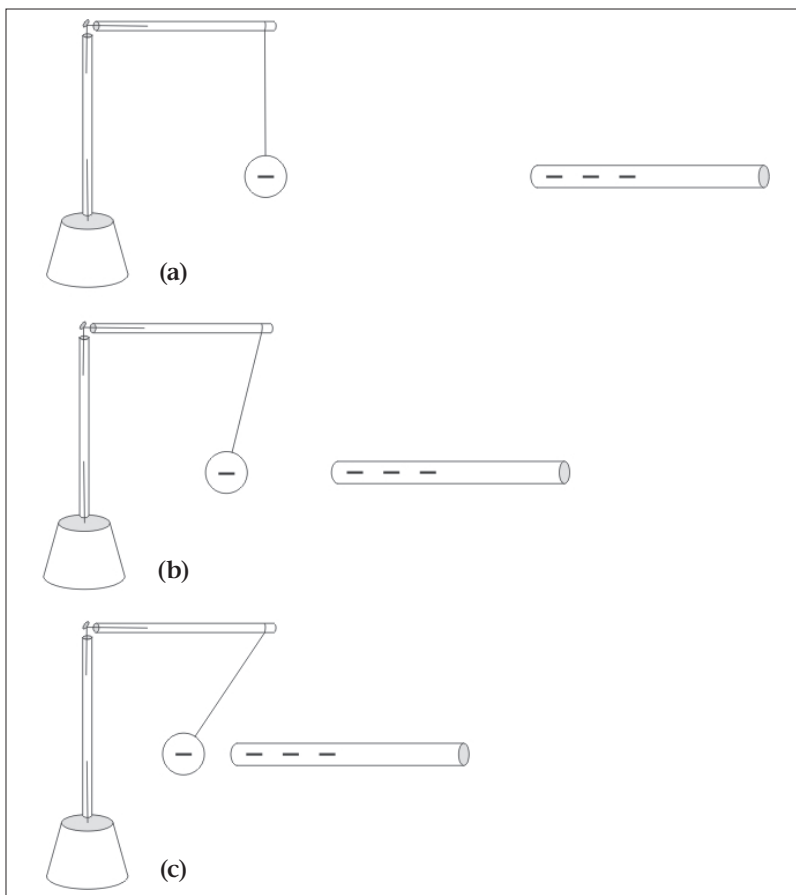
**Esperimento 5.22**

Un pendolo elettrico *I* è caricato negativamente col metodo ACR, come negli Esperimenti 5.1 e 5.15. Dopo questa procedura, mettiamo via la cannuccia negativa che l'ha caricato per contatto. In questa situazione il filo del pendolo torna in verticale. Carichiamo un'altra cannuccia positivamente strofinandola tra due tubi di gomma dura. Portiamo lentamente la cannuccia positiva vicino al pendolo negativo, senza contatto, fino a

Figura 5.26. Diminuendo la distanza tra il disco di carta negativo e la punta positiva della cannuccia strofinata, aumentiamo la forza di attrazione tra di loro.

quando siamo in grado di rilevare la loro attrazione, che sarà resa evidente dall'inclinazione del filo rispetto alla verticale. La cannuccia orizzontale deve essere alla stessa altezza del disco di carta, avvicinandosi ad esso di lato. Diminuiamo lentamente la distanza tra il disco di carta e la punta della cannuccia strofinata. Osserviamo che diminuendo questa distanza, aumenta l'angolo di inclinazione del filo rispetto alla verticale (Figura 5.26). Questo dimostra che la forza di attrazione tra i corpi elettrizzati di carica opposta aumenta quando la distanza tra i corpi interagenti diminuisce. La forza è indicata in questo esperimento dall'angolo d'inclinazione del pendolo rispetto alla verticale.

### Esperimento 5.23

Un pendolo elettrico *I* è caricato negativamente col metodo ACR, come negli Esperimenti 5.1 e 5.15. Dopo questa procedura, mettiamo via la cannuccia negativa che l'ha caricato per contatto. In questa situazione il filo del pendolo ritorna alla verticale. Ora riportiamo lentamente la cannuccia negativa nei pressi del pendolo carico fino alla distanza alla quale la repulsione inizia ad essere visibile, cosa che è indicata dalla deviazione del pendolo rispetto alla verticale. La cannuccia deve essere tenuta in orizzontale, alla stessa altezza del disco di carta e portata verso di esso dal lato. Diminuiamo poi lentamente la distanza tra il disco di carta e la punta strofinata della cannuccia. Osserviamo che quando questa distanza diminuisce, l'angolo d'inclinazione del filo rispetto alla verticale aumenta, come mostrato nella figura 5.27. E questo indica una forza di repulsione che aumenta al diminuire della distanza tra i corpi interagenti.

Figura 5.27. Diminuendo la distanza tra il disco di carta negativo e la punta negativa della cannuccia strofinata, aumentiamo la forza repulsiva tra loro.

In questo esperimento la cannuccia strofinata non dovrebbe avvicinarsi troppo al pendolo elettrizzato. Il motivo è che in alcune situazioni si possono attrarre l'un l'altro quando la distanza reciproca fra loro è troppo piccola. Questo sarà discusso nella sezione 7.10.

## 5.7 Variazione della forza elettrica con la quantità di carica

Finora non ci siamo presi la briga di misurare la quantità di elettricità (o la grandezza della carica elettrica). Generalmente questo viene fatto utilizzando la nozione di forza elettrica.

Siano *A*, *B* e *C* tre corpi le cui dimensioni sono piccole rispetto alla distanza tra loro. Considereremo i corpi *A* e *B* elettrizzati (per strofinio o tramite il meccanismo ACR). Chiamiamo $F_{AC}$ la forza tra *A* e *C* quando sono separati dalla distanza *d*, con il corpo *B* lontano da questi due corpi. Chiamiamo $F_{BC}$ la forza tra *B* e *C*, quando questi due corpi sono separati da una distanza *d*, con *A* lontano da questi due corpi.

**Definizioni:** Diciamo che la grandezza della carica *A* è uguale alla grandezza della carica *B* quando $F_{AC} = F_{BC}$. Se $F_{AC}$ è più grande di $F_{BC}$, allora diciamo che la grandezza della carica *A* è maggiore della grandezza della carica *B*. Se $F_{AC}$ è più piccola di $F_{BC}$, allora diciamo che la grandezza della carica *A* è più piccola della grandezza della carica *B*.

L'intensità della forza può essere misurata in diversi modi. Qui consideriamo situazioni in cui le distanze sono sempre uguali. Nell'Esperimento 2.1, per esempio, più sono i pezzi di carta raccolti dalla cannuccia, maggiore è la forza che essa esercita su di loro. Nell'Esperimento 2.8 l'intensità della forza è indicata dalla curvatura del flusso di liquido che cade. Nell'Esperimento 4.1 l'intensità di forza è indicata dall'angolo di apertura tra le strisce di plastica elettrizzate. Negli esperimenti con il pendolo elettrico, come nell'Esperimento 4.5, l'intensità di forza è indicata dall'angolo tra il pendolo e la verticale. Negli esperimenti con il filo di plastica pendulo l'intensità della forza è indicata dall'angolo di apertura tra le strisce di plastica, come nell'Esperimento 5.11.

Per esempio, date due cannucce di plastica elettrizzate *A* e *B*, abbiamo definito che la cannuccia più elettrizzata è quella che, alla stessa distanza dal tavolo o dal flusso del liquido in caduta, attira più pezzi di carta o causa una maggiore curvatura del liquido fluente (Figura 5.28). Il corpo *C* in questo caso è un pezzo di carta o il flusso di acqua. La cannuccia più elettrizzata sarà anche quella che, alla stessa distanza da un pendolo elettrico, provoca una maggiore inclinazione del pendolo rispetto alla verticale. La stessa definizione può essere applicata agli altri esperimenti descritti in questo libro.

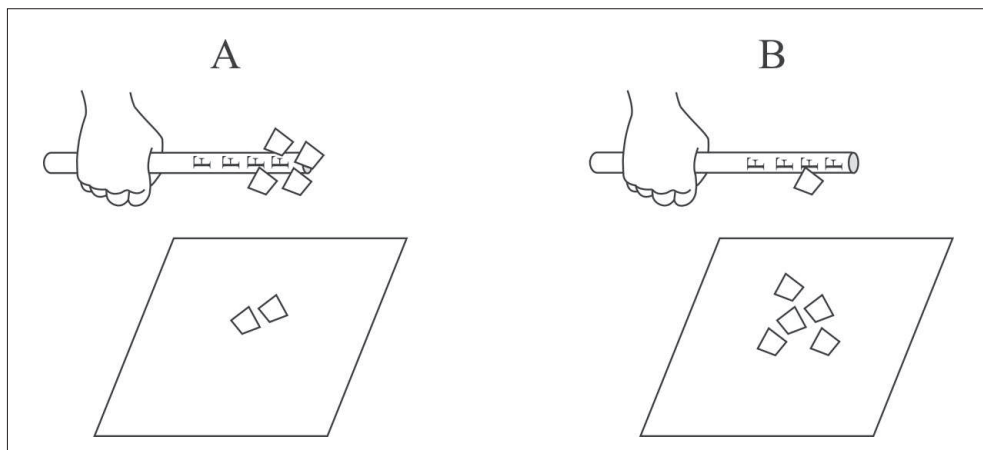



Figura 5.28. Le cannucce A e B sono alla stessa distanza da un tavolo. La cannuccia A è più elettrizzata della B perché attira più pezzi di carta.

Nella Sezione 5.6 abbiamo visto che l'intensità della forza aumenta quando la distanza fra i corpi interagenti diminuisce. Questo suggerisce un altro procedimento per misurare l'elettrizzazione di un corpo. Definiamo che la quantità di carica di un corpo è indicata dalla distanza alla quale la sua forza elettrica crea effetti visibili. Per esempio, supponiamo di avere due cannucce di plastica elettrizzate *A* e *B* della stessa dimensione. Supponiamo che *A* inizi ad attrarre pezzi di carta ad una distanza di 15 cm da un tavolo, mentre per *B* questa attrazione inizia solo quando è ad una distanza di 5 cm dal tavolo. In questo caso definiamo *A* più elettrizzata di *B*, cioè che *A* ha una maggiore quantità di carica elettrica rispetto a *B* (Figura 5.29).

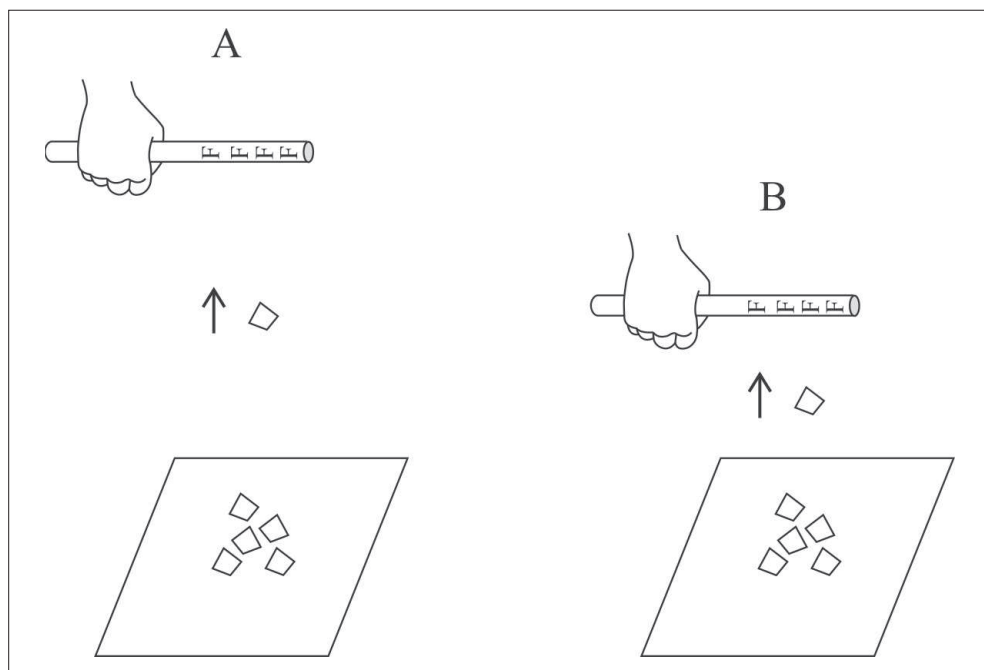



Figura 5.29. La cannuccia *A* è più elettrizzata della cannuccia *B* perché inizia ad attrarre i pezzi di carta ad una distanza maggiore dal tavolo.

Anche gli altri effetti inizieranno ad essere osservati o rilevati a una maggiore distanza per *A* che per *B*. Per esempio, consideriamo che il corpo *A* causi la deviazione del flusso d'acqua cadente (o del pendolo elettrico) quando è ad una distanza $d_1$ dall'acqua (o dal pendolo). Per il corpo *B* la distanza equivalente sarà $d_2$. Quando *A* è più elettrizzato di *B*, si osserva che $d_1 > d_2$.

In conclusione, per definizione, la forza elettrica aumenta con la quantità di carica.

Presentiamo ora alcuni esperimenti semplici ma non banali.

### Esperimento 5.24

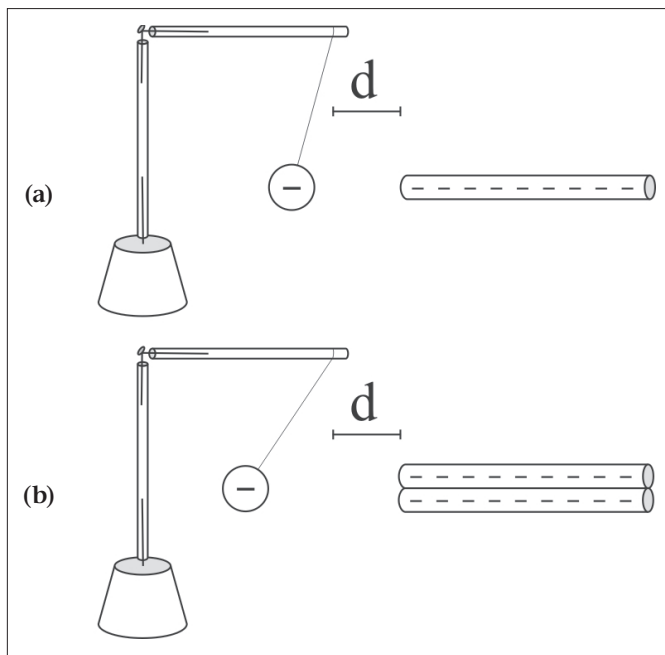
Scegliamo due cannucce di plastica elettrizzate per strofinio. Poniamone una in orizzontale e parallela ad un tavolo con molti pezzi di carta sopra. Supponiamo che attragga *N* pezzi di carta quando è ad una distanza *d* dal tavolo. Supponiamo inoltre che la seconda cannuccia elettrizzata attiri anche circa *N* pezzi di carta quando è alla stessa distanza *d* dal tavolo. Dalla precedente definizione in Sezione 5.7, concludiamo che esse hanno la stessa quantità di carica.

Allontaniamo poi le cannucce dal tavolo. Uniamole, ponendole fianco a fianco, orizzontalmente. Portiamole insieme verso il tavolo fino a quando non sono alla stessa distanza *d* dal tavolo come prima. Osserviamo che insieme attraggono un numero di pezzi di carta più grande che ciascuna di esse separatamente.

Quando uniamo tre o quattro cannucce ugualmente elettrizzate, il numero di pezzi di carta attirati aumenta ancora di più alla stessa distanza dal tavolo.

### Esperimento 5.25

Immaginiamo di avere due cannucce di plastica che siano state uniformemente elettrizzate per strofinio lungo tutta la loro lunghezza. Supponiamo che esse abbiano all'incirca le stesse cariche elettriche, come indicato dalla definizione precedente. Carichiamo un pendolo elettrico con il metodo ACR facendogli toccare una delle cannucce elettrizzate. Dopo questa procedura, il pendolo comincia ad essere respinto dalla cannuccia. Allontaniamo la cannuccia e il pendolo elettrizzato ritorna alla verticale. Poniamo la cannuccia orizzontalmente alla stessa altezza del disco del pendolo. Supponiamo che il pendolo sia inclinato di un angolo $\vartheta$ rispetto alla verticale, quando l'estremità più vicina della cannuccia è ad una distanza *d* dalla verticale che passa attraverso il supporto del pendolo, come nella Figura 5.30 (a).

Figura 5.30. **(a)** La forza su di un pendolo carico esercitata da una cannuccia carica è minore della **(b)** forza esercitata sullo stesso pendolo da due cannucce altrettanto cariche, alla stessa distanza dalla verticale passante per il punto di supporto del filo.

Uniamo le due cannucce sfregate e portiamole alla stessa distanza *d* dal pendolo elettrico carico. Osserviamo che il pendolo devia di un angolo maggiore di $\vartheta$ dalla verticale, come in Figura 5.30 (b). Questo esperimento infatti, insieme alla definizione precedente, mostra che due corpi ugualmente carichi, se messi insieme, hanno una carica maggiore di ciascuno di questi corpi individualmente.

Quando uniamo tre cannucce ugualmente cariche, osserviamo che l'angolo di inclinazione del pendolo aumenta ancora di più. Questo indica un nuovo aumento nella forza.

**Definizione**: Queste osservazioni permettono una nuova definizione. Supponiamo di avere $N$ corpi ugualmente elettrizzati con cariche dello stesso segno. Supponiamo di unire questi $N$ corpi carichi in un sol gruppo. Definiamo la quantità di carica di questo insieme come $N$ volte la quantità di carica di un singolo corpo.

Nonostante questa definizione sia molto semplice, essa non è banale. Illustriamo questo con un esempio. Il livello di un termometro a mercurio può essere definito come un indicatore della temperatura di un corpo. Per esempio, possiamo definire che due corpi $A$ e $B$ hanno la stessa temperatura se il livello di questo termometro messo in contatto con $A$ è uguale al livello dello stesso termometro messo in contatto con $B$. Quando il livello del termometro è superiore (inferiore) per $A$ rispetto a $B$, allora diciamo che $A$ ha una temperatura superiore (inferiore) rispetto a $B$. Tuttavia, un semplice esperimento mostra che quando uniamo i due corpi $A$ e $B$, entrambi alla stessa temperatura, in modo tale che si tocchino l'un l'altro, il livello del termometro non viene modificato. Grazie a esperimenti di questo tipo, noi non definiamo la temperatura di un insieme $AB$ (cioè con $A$ e $B$ che si toccano l'un l'altro) come il doppio della temperatura di $A$.

Per quanto riguarda i pesi e le cariche elettriche, molti esperimenti dimostrano che quando mettiamo insieme $N$ corpi che hanno la stessa proprietà, gli effetti elettrici e gravitazionali prodotti da questi $N$ corpi saranno superiori all'effetto prodotto da uno solo di questi corpi. Esperimenti come questi portano alla precedente definizione. In altre parole, esperimenti come questi rendono ragionevole tale definizione.

## Esperimento 5.26

Leghiamo le estremità di due pezzi di cannuccia di plastica aventi la stessa lunghezza e peso con un piccolo filo di seta. Possiamo fare due o tre gruppi di tali elementi. Strofiniamo ogni gruppo tra i capelli, ma per qualcuno questa frizione sia più rapida e più intensa. Quando avviciniamo ciascuno di questi insiemi ad un pendolo con carica negativa, vediamo che ciascuno di loro inclina il pendolo di un angolo diverso, anche quando sono tutti alla stessa distanza dalla verticale passante per il punto di sostegno del filo del pendolo. Questo ci dice che ogni sistema così costruito ha una diversa quantità di cariche elettriche (Figura 5.31).

Figura 5.31. Corpi aventi diverse quantità di carica. Le plastiche in (**b**) hanno una carica elettrica maggiore delle plastiche in (**a**).

Ognuno di questi sistemi può essere appeso ad un supporto orizzontale (ad esempio una matita) mediante del filo di seta. Osserviamo allora che le cannucce non rimangono in verticale, ma si respingono. Inoltre, il gruppo che respingeva il pendolo carico con maggiore forza è anche quello per il quale i due pezzi di cannuccia si inclinano di più rispetto alla verticale (Figura 5.32). Poiché le cannucce di tutti i gruppi hanno lo stesso peso, questo dimostra ancora una volta che allorché aumentiamo la carica che esse contengono, aumentiamo anche la forza elettrica che si esercita tra loro.

Figura 5.32. Aumentando la quantità di carica in ciascuna coppia di cannucce, cresce la forza che si esercita tra loro.

## Note

[1] [DF33b, pp. 464-465] e [RR57, p. 586]: "[...] Il demeure donc pour constant, que les corps devenus électriques par communication, sont chassés par ceux qui les ont rendus électriques; mais le sont-ils de même par les autres corps électriques de tous les genres? & les corps électriques ne différent-ils entre-eux que par les divers degrés d'électricité? Cet examen m'a conduit à une autre vérité que je n'aurois jamais soupçonnée, & dont je crois que personne n'a encore eu la moindre idée.

J'ai commencé par soûtenir en l'air avec le même tube, deux feuilles d'or, & elles se sont toûjours éloignées l'une de l'autre, quelques efforts que j'aye faits pour les rapprocher, & cela devoit arriver de la sorte, puisque elles étoient toutes deux électriques; mais si-tôt que l'une des deux avoit touché la main ou quelque autre corps, elles se joignoient sur le champ l'une à l'autre, parce que celle-ci ayant perdu son électricité, l'autre l'attiroit & tendoit vers elle: tout cela s'accordoit parfaitement avec mon hypothése, mais ce qui me déconcerta prodigieusement, fut l'expérience suivante.

Ayant élevé en l'air une feuille d'or par le moyen du tube, j'en approchai un morceau de gomme copal frottée, & renduë électrique, la feuille fut s'y appliquer sur le champ, & y demeura; j'avouë que je m'attendois à un effet tout contraire, parce que selon mon raisonnement, la copal qui étoit électrique devoit repousser la feuille qui l'étoit aussi; je répétai l'expérience un grand nombre de fois, croyant que je ne présentois pas à la feuille l'endroit qui avoit été frotté, & qu'ainsi elle ne s'y portoit que comme elle auroit fait à mon doigt, ou à tout autre corps, mais ayant pris sur cela mes mesures, de fa con à ne me laisser aucun doute, je fus bien convaincu que la copal attiroit la feuille d'or, quoiqu'elle fût repoussée par le tube: la même chose arrivoit en approchant de la feuille d'or un morceau d'ambre, ou de cire d'Espagne frotté.

Après plusieurs autres tentatives qui ne me satisfaisoient aucunement, j'approchai de la feuille d'or chassée par le tube, une boule de cristal de roche frottée & renduë électrique, elle repoussa cette feuille de même que le tube. Un autre tube que je fis présenter à la même feuille la chassa de même, enfin je ne pus pas douter que le verre & le cristal de roche, ne fissent précisément le contraire de la gomme copal, de l'ambre & de la cire d'Espagne, ensorte que la feuille repoussée par les uns, à cause de l'´electricité qu'elle avoit contractée, étoit attirée par les autres; cela me fit penser qu'il y avoit peut-être deux genres d'électricité différents, & je fus bien confirmé dans cette idée par les expériences suivantes."

[2] Vedi Appendice A

[3] [Hei99, p. 257]

[4] [DF33b pp. 467 e 469): "Voilà donc constamment deux électricités d'une nature toute différente, sçavoir, celle des corps transparents & solides, comme le verre, le cristal, etc. & celle des corps bitumineux ou résineux, comme l'ambre, la gomme copal, la cire d'Espagne, etc. Les uns & les autres repoussent les corps qui ont contracté une électricité de même nature que la leur, & ils attirent, au contraire, ceux dont l'électricité est d'une nature différente de la leur. [...]

Voilà donc deux électricités bien démontrées, & je ne puis me dispenser de leur donner des noms différents pour éviter la confusion des termes, ou l'embarras de définir à chaque instant celle dont je voudrai parler; j'appellerai donc l'une l'*électricité vitrée*, & l'autre l'*électricité résineuse*, non que je pense

qu'il n'y a que les corps de la nature du verre qui soient doués de l'une, & les matiéres résineuses de l'autre, car j'ai déja de fortes preuves du contraire, mais c'est parce que le verre & la copal sont les deux matiéres qui m'ont donné lien de découvrir ces deux différentes électricités".

[5] [DF, pp. 263-264]

[6] [BWa] e [BWb].

[7] [DF33b, pp. 472-473].

[8] [DF33b, pp. 469-470]: "Pour juger donc quelle est l'espece d'électricité d'un corps quelconque, il n'y a qu'à le rendre électrique, & lui présenter l'un après l'autre un morceau de verre & un morceau d'ambre, il sera certainement attiré par l'un, & repoussé par l'autre; [...]".

[9] [DF33b, pp. 473-474]: "Il y a encore un moyen bien simple pour connoître le genre d'électricité d'un corps dans lequel cette vertu est très-faible [...] J'épargnerai cependant au lecteur un détail ennuyeux & rebutant d'expériences manquées ou imparfaites, & je dirai seulement que pour réussir, il faut se servir d'une aiguille de verre posée sur un pivot de verre très-long, que cette aiguille porte à l'un de ses bouts une boule de métal creuse, & à l'autre un contre-poids de verre, qu'il faut bien sécher toutes ces piéces, & qu'alors il faut communiquer l'électricité à la boule de métal avec le tube, ou quelqu'autre matiére analogue, la boule sera alors attirée par les corps dont l'électricité est résineuse, & repoussée par ceux qui ont l'électricité vitrée".

[10] [Can54].

[11] [Hei99, pp. 387-388].

[12] [Wil59] e [Hei99, pp. 387-388].

# Capitolo 6

# Conduttori e isolanti

### 6.1 L'elettroscopio

Abbiamo già costruito un versorium ed un pendolo elettrico. Ora costruiamo un altro strumento, l'*elettroscopio*. Ce ne sono diverse varietà e qui presentiamo solo alcune di loro. A volte il versorium e il pendolo elettrico sono anche chiamati elettroscopi, a causa del fatto che essi indicano la presenza di corpi carichi nelle loro vicinanze. Ma in questo libro riserveremo il nome elettroscopio allo strumento descritto nella presente Sezione e discuteremo pure le proprietà che lo distinguono dagli strumenti precedenti.

Forse il modello più semplice è quello fatto con cartone sottile. Tagliamo un rettangolo con lati di 7 e 10 cm, con il lato più lungo messo in verticale (Figure 6.1 e 6.2). Attacchiamo il rettangolo ad una cannuccia di plastica con due pezzi di nastro adesivo. Il nastro deve essere applicato sul lato posteriore del rettangolo e non estendersi oltre i suoi bordi. L'estremità superiore della cannuccia dovrebbe essere prossima al bordo superiore del rettangolo, senza andare oltre.

Tagliamo una striscia molto piccola di carta velina, larga da 1 a 3 mm e lunga da 6 a 9 cm. Gli effetti che saranno descritti in questo Capitolo diventano più visibili quando utilizziamo una striscia molto sottile e leggera. Questa carta velina può essere del tipo utilizzato per costruire aquiloni o impiegato per impacchettare regali fragili. Incolliamo l'estremità superiore di questa striscia nella parte media del rettangolo, nel punto più alto. La striscia non deve essere piegata e non deve superare il bordo inferiore del rettangolo. Invece della colla, possiamo anche fissarla con un piccolo pezzo di nastro adesivo, a condizione che il nastro non vada oltre il bordo del rettangolo.

Prepariamo un supporto per l'elettroscopio come quello descritto nella Sezione 4.4. *Un accorgimento cruciale per l'elettroscopio è quello di usare una cannuccia di plastica come supporto per il cartone.* In altre parole, il cartone non deve essere attaccato, ad esempio, ad uno spiedino di legno o di metallo. La cannuccia di plastica viene poi posta sopra il fermaglio per carta del solito supporto. Se il rettangolo non rimanesse del tutto in verticale, potremmo mettere due cannucce insieme, una dentro l'altra, in modo da rendere più rigida la loro tenuta. Nella Sezione 6.5 presenteremo i componenti fondamentali di un elettroscopio come questo, dopo aver eseguito diversi esperimenti con esso.

Figura 6.1. Elettroscopio visto di fronte.

Ci sono anche diversi modelli alternativi di elettroscopio. Possiamo coprire il rettangolo di cartone sottile con un foglio di alluminio e al posto della carta velina possiamo anche usare una sottile fettuccia di alluminio per alimenti. Inoltre, invece di incollare la carta velina o fissarla con

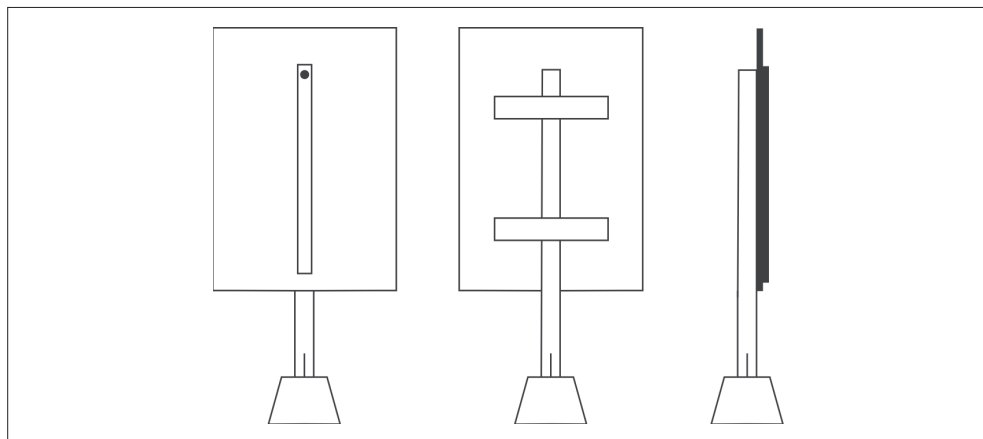



Figura 6.2. **(a)** Elettroscopio visto di fronte. **(b)** Vista posteriore. **(c)** Vista di profilo.

del nastro adesivo, si può anche fissarla con un piccolo gancio di metallo attaccato al rettangolo. Facendo poi un piccolo foro con un ago nella parte superiore della fettuccia, lo si inserirebbe nel gancio. I rettangoli possono avere anche altre dimensioni, per esempio 2 per 8 cm. Le dimensioni di 7 per 10 cm, qui utilizzate, sono convenienti per alcuni degli esperimenti descritti in questo lavoro, dato che 7 cm è una larghezza un po' più grande del diametro della tazza da caffè di plastica utilizzata come supporto.

Alcuni elettroscopi hanno una copertura superiore, anche se questa non è essenziale per il successo della maggior parte degli esperimenti qui descritti. Normalmente questa copertura è un disco di cartone sottile avente un diametro uguale al lato del rettangolo (nel nostro esempio questo significherebbe un disco con un diametro di 7 cm). Potremmo coprire anche questo disco superiore con un foglio di alluminio, ma, ancora una volta, questo non è essenziale. Per fissare il disco superiore al rettangolo, ci sono diverse possibilità. (a) La più semplice è piegare la striscia superiore orizzontale del rettangolo (larghezza 0,5 o 1 cm e 7 cm di lunghezza). Il disco viene poi incollato su tale striscia. (b) Un metodo alternativo per fissare il disco superiore è fare un foro al centro. Una gamba di un fermaglio per carta passa verticalmente attraverso questo foro ed è attaccata all'interno della cannuccia verticale di plastica che tiene il rettangolo. Si può posizionare la seconda gamba del fermaglio di carta orizzontalmente rispetto al disco, e fissarla all'interno di un secondo foro praticato su una sezione appropriata del disco.

L'elettroscopio descritto in Figura 6.2 è composto da un'unica striscia mobile, con il rettangolo attaccato al supporto. Un altro modello comune di elettroscopio ha due strisce mobili, o due foglie mobili. È questo il modello che è rappresentato nella maggior parte dei testi sull'elettricità. Il modo più semplice per fare un elettroscopio come questo è di incollare insieme le estremità superiori di due strisce di carta velina sul bordo inferiore di un rettangolo. Nella Figura 6.3 presentiamo un elettroscopio come questo. Si tratta, ancora una volta, di attaccare il rettangolo di cartone sottile ad una cannuccia di plastica con due pezzi di nastro adesivo sul lato posteriore. Sul lato inferiore sinistro dell'elettroscopio incolliamo le estremità superiori delle due strisce di carta velina (o di due sottili strisce di alluminio). Esse devono essere della stessa lunghezza e le loro estremità inferiori devono essere libere di allontanarsi l'una dall'altra. Possiamo definire questo modello *elettroscopio classico*. Se vogliamo, possiamo anche incollare alcune coppie di strisce lungo il bordo inferiore del rettangolo.

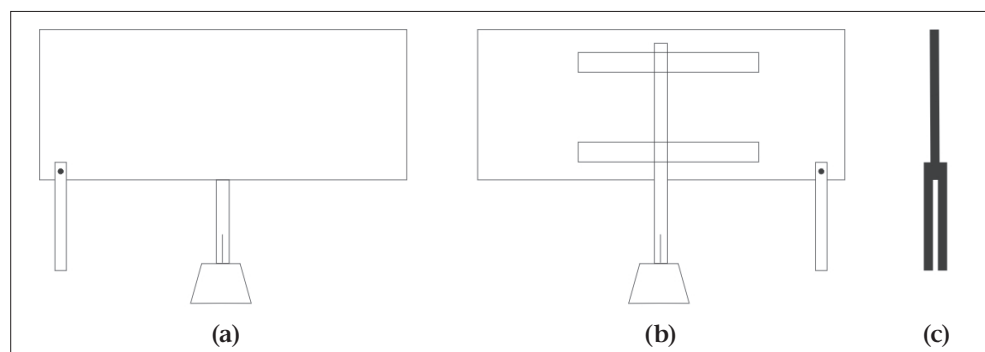



Figura 6.3. **(a)** Elettroscopio classico visto di fronte. **(b)** Vista posteriore. **(c)** Vista di profilo, che mostra solo il cartoncino e le due strisce.

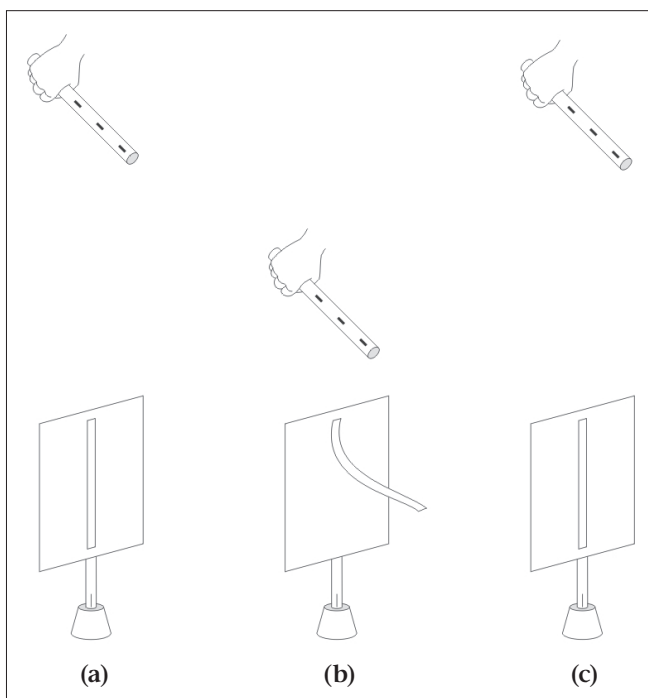
Possiamo anche realizzare un elettroscopio classico piegando una singola striscia di carta velina a metà. La poniamo poi a cavallo, giusto al centro, su un supporto rigido orizzontale, ad esempio un filo metallico. Le due metà della striscia pendono quindi faccia a faccia, con le estremità inferiori libere di allontanarsi l'una dall'altra. Il filo metallico deve essere retto dal basso da cannucce di plastica, o può essere sostenuto superiormente da fili di seta.

Il modello più raffinato di elettroscopio classico è fatto con due foglie d'oro. Normalmente è circondato da una copertura in vetro per evitare perturbazioni dovute al flusso d'aria.

## 6.2 Esperimenti con l'elettroscopio

### Esperimento 6.1

Strofiniamo una cannuccia di plastica tra i capelli e portiamola lentamente vicino alla parte superiore dell'elettroscopio, senza toccarlo. La striscia si allontana dall'elettroscopio. Quando mettiamo via la cannuccia, la striscia ritorna al suo originario orientamento verticale lungo il cartoncino (Figura 6.4).

Figura 6.4. **(a)** e **(b)**: Quando portiamo una plastica caricata vicino all'elettroscopio, senza toccarlo, la striscia si solleva. **(c)** Quando allontaniamo la plastica elettrizzata, la striscia scende.

### Esperimento 6.2

Ripetiamo l'Esperimento 6.1, ma ora appoggiamo la cannuccia sul bordo superiore dell'elettroscopio e facciamola strisciare su di esso. La situazione ideale è quella di toccare il cartoncino con una porzione della cannuccia che è prossima alle dita che la mantengono e poi di strisciarla, allontanandola dal rettangolo. La cannuccia dovrebbe essere tirata all'indietro, verso il lato posteriore del rettangolo e non verso la striscia di carta velina. Questa procedura può essere ripetuta una o più volte e anche, se possibile, girando la cannuccia mentre la strisciamo. Per facilitare la strisciatura, possiamo tener fermo l'elettroscopio reggendo con la mano la sua cannuccia verticale. Tuttavia, non dobbiamo mai toccare il rettangolo, che è fatto di cartone sottile, né la striscia di carta. Osserviamo che la carta velina si allontana dall'elettroscopio mentre il cartoncino viene strisciato.

Allontaniamo ora la cannuccia dall'elettroscopio. In questo caso osserviamo che la striscia rimane sollevata, staccata dal rettangolo (Figura 6.5).

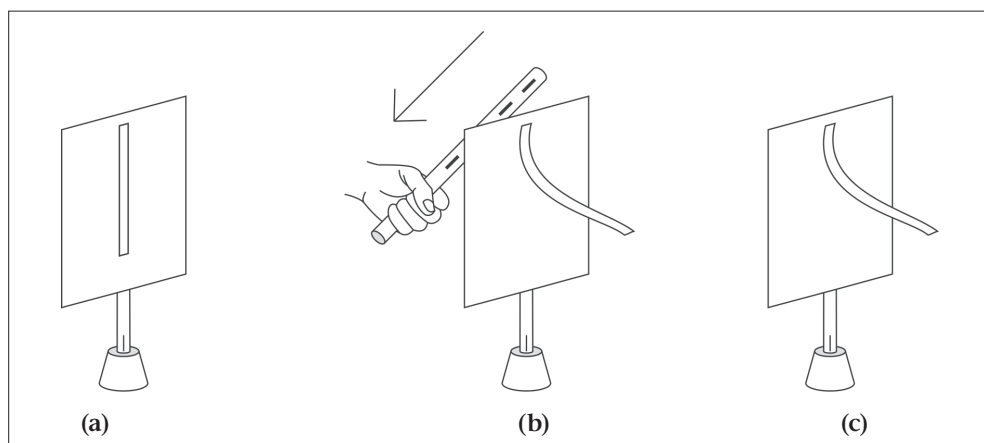



Figura 6.5. **(a)** Elettroscopio con la striscia rivolta verso il basso. **(b)** Strisciamo il bordo superiore del rettangolo con una cannuccia strofinata. **(c)** Quando la cannuccia è messa via, la striscia rimane lontana dall'elettroscopio!

### Esperimento 6.3

Dopo avere eseguito l'Esperimento 6.2 e tolto la cannuccia, la striscia rimane lontana dall'elettroscopio. Quando portiamo lentamente il dito lateralmente in prossimità dell'estremità inferiore di questa striscia, evitando di toccarla, osserviamo che la striscia è attratta dal dito e si muove verso di esso. Quando togliamo il dito, la striscia rimane distante dall'elettroscopio.

Da quello che abbiamo visto nella Sezione 3.5, questo significa che l'elettroscopio è diventato elettricamente carico a causa della procedura dell'Esperimento 6.2. Esso è stato caricato strisciando sul suo bordo una plastica strofinata. Questo esperimento è analogo all'Esperimento 4.7.

Ma ora abbiamo qualcosa di nuovo. Quando caricavamo un pendolo elettrico col metodo ACR, esso veniva respinto dalla plastica allorché l'avvicinavamo. Tuttavia, rimossa la plastica strofinata, il filo del pendolo ritornava in verticale, anche se il pendolo rimaneva carico. Se non avessimo osservato questo esperimento e visto il pendolo verticale, noi non avremmo saputo dire se il pendolo fosse carico o meno. Per provarlo, avremmo potuto mettere un dito vicino al disco di carta del pendolo, senza toccarlo. Se il pendolo non si fosse mosso, questo avrebbe indicato la sua neutralità. Al contrario,

se il pendolo si fosse orientato verso il dito, avremmo saputo che era stato caricato da qualche meccanismo. Per conoscere il segno di questa carica, si potrebbe avvicinare al pendolo un altro corpo di cui la carica è nota, positiva per esempio. Se si verificasse una repulsione, sapremmo che il pendolo è positivamente carico. Nel caso di una forte attrazione, sapremmo che il pendolo è negativamente carico.

L'elettroscopio, invece, presenta un comportamento diverso. Dopo che è stato caricato, la sua striscia rimane distante dal rettangolo anche quando la cannuccia strofinata, utilizzata per caricarlo, è stata spostata lontano dal sistema. Questo significa che è sufficiente guardare la striscia di un elettroscopio, per sapere se esso è carico o no. Quando la striscia punta verticalmente verso il basso, parallelamente al rettangolo, l'elettroscopio è scarico. Quando la striscia è sollevata rispetto al rettangolo, sappiamo che l'elettroscopio è stato caricato. In quest'ultima situazione, ciò che impedisce alla striscia di cadere, a causa del suo peso, è la repulsione tra le cariche presenti lungo di essa e le cariche dello stesso segno distribuite sul rettangolo di cartoncino.

**Esperimento 6.4**

Carichiamo l'elettroscopio come nell'Esperimento 6.2. Togliamo la plastica strofinata e la striscia rimane sollevata, lontano dall'elettroscopio. Muoviamo ora il dito vicino al bordo superiore dell'elettroscopio e tocchiamolo. Subito la striscia scende, aderendo al rettangolo. Quando togliamo il dito, la striscia rimane verticale (Figura 6.6).

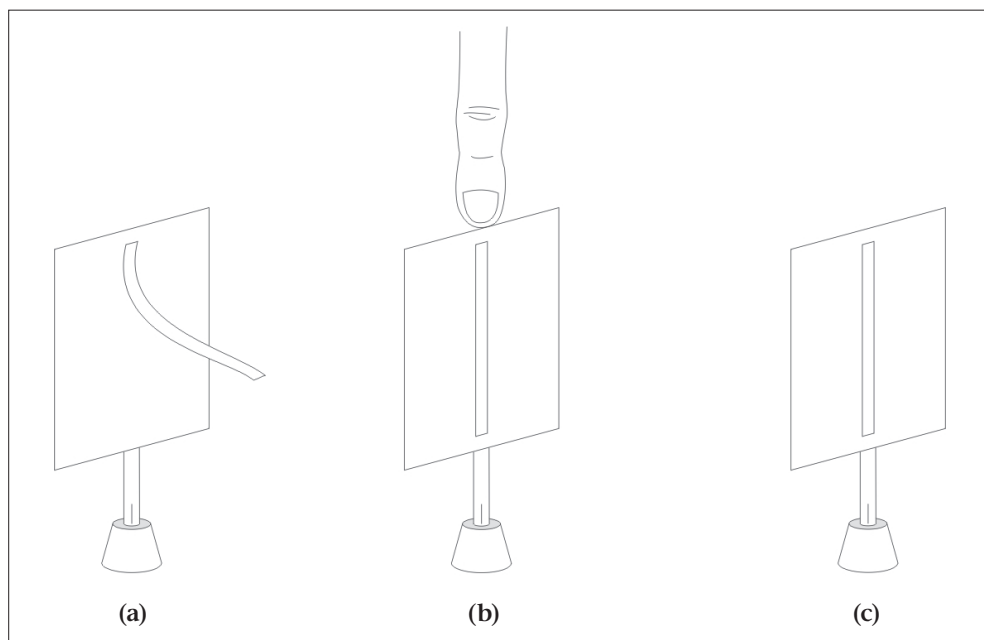



Figura 6.6. Scarica di un elettroscopio per contatto. **(a)** Un elettroscopio inizialmente carico. **(b)** Quando tocchiamo il bordo superiore del cartoncino, la striscia scende. **(c)** La striscia rimane verticale dopo che togliamo il dito.

Quando riavviciniamo il dito all'estremità inferiore della striscia dal lato, osserviamo che il nastro non si muove più verso il dito, come aveva fatto prima nell'Esperimento 6.3. Concludiamo che nel toccare il cartoncino abbiamo scaricato l'elettroscopio, come nel caso nell'Esperimento 4.9. Questo è dovuto alla messa a terra elettrica (Sezione 4.5).

### Esperimento 6.5

Carichiamo l'elettroscopio strisciandogli sopra con una cannuccia strofinata, come nell'Esperimento 6.2. Usiamo di nuovo la cannuccia strofinata che abbiamo usato in precedenza per caricare l'elettroscopio. In particolare, portiamo lentamente la cannuccia vicino alla striscia sollevata dell'elettroscopio. La cannuccia strofinata deve essere orizzontale, alla stessa altezza dell'estremità inferiore della striscia sollevata. Il movimento di avvicinamento deve essere molto lento, per evitare ogni contatto. Dobbiamo osservare attentamente la direzione in cui il nastro cerca di muoversi, cioè se si muove verso la cannuccia strofinata o lontana da essa. Eseguendo con attenzione questo esperimento, osserviamo che la striscia si sposta verso il rettangolo, cioè, si allontana dalla cannuccia strofinata che si sta avvicinando. Possiamo anche indurre la striscia a muoversi avanti e indietro con la cannuccia strofinata, muovendola verso la striscia e lontano da essa. La striscia si sposterà alla stessa velocità, verso l'elettroscopio e lontano da esso. Se vogliamo osservare questo movimento oscillatorio della striscia, l'ampiezza del movimento della cannuccia strofinata deve essere piccola. Cioè, dobbiamo utilizzare piccoli movimenti ed evitare di portarla molto vicino alla striscia (Figura 6.7).

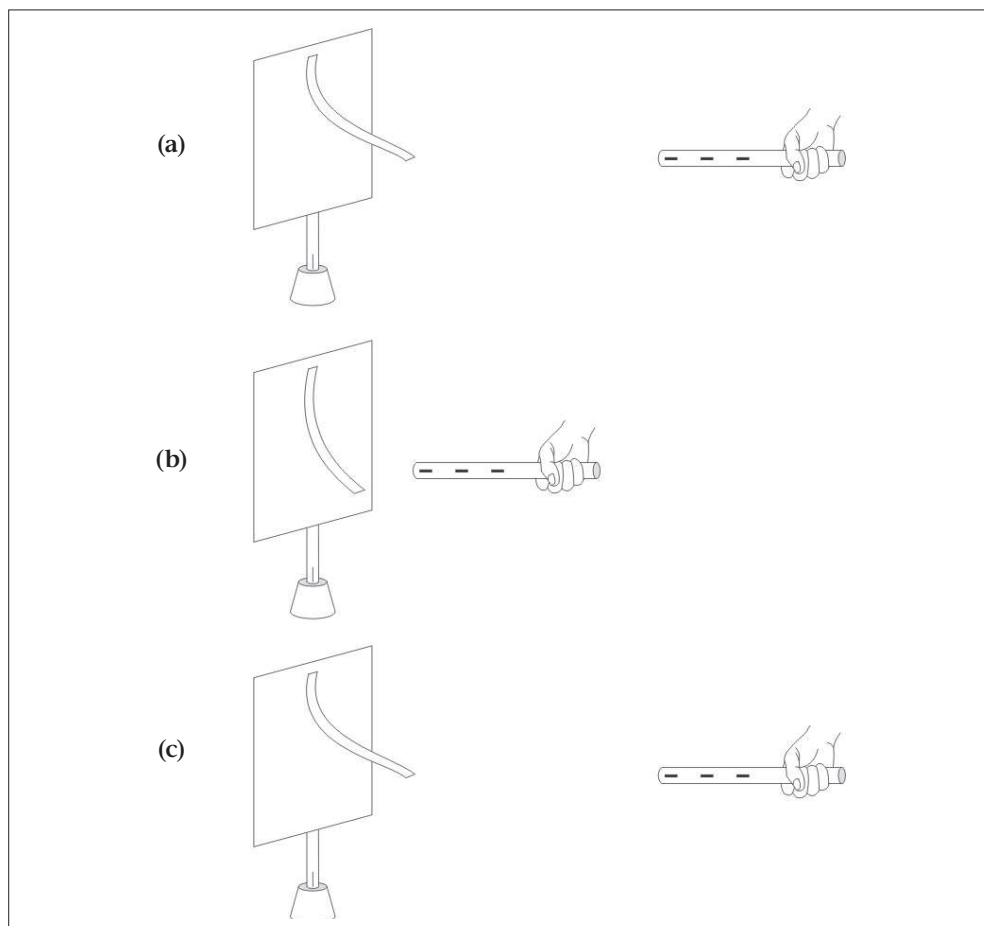



Figura 6.7. Repulsione tra la plastica carica e l'elettroscopio mediante essa caricato. **(b)** Quando si sposta la plastica vicino all'elettroscopio, la striscia scende. Quando la plastica viene allontanata dall'elettroscopio, la striscia si solleva, **(a)** e **(c)**.

Questo dimostra che nell'Esperimento 6.2 l'elettroscopio si è elettrizzato con una carica dello stesso segno di quella della cannuccia strofinata, in quanto vi è una repulsione fra loro. Possiamo quindi rappresentare le cariche dell'elettroscopio elettrizzato come aventi lo stesso segno delle cariche della plastica strofinata che è stata strisciata sul cartoncino (Figura 6.8).

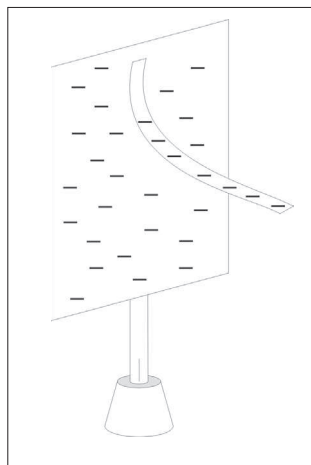
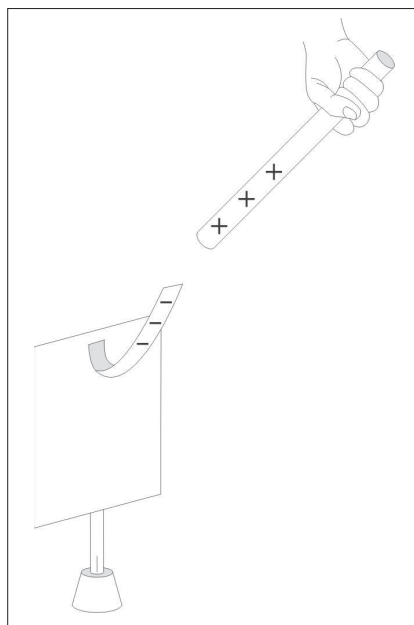



Figura 6.8. Cariche distribuite su un elettroscopio che è stato elettrizzato con una cannuccia negativa.

Figura 6.9. Attrazione tra una cannuccia positiva e un elettroscopio negativo.

### Esperimento 6.6

Ripetiamo l'Esperimento 6.2 e carichiamo un elettroscopio negativamente, strisciandogli sopra una cannuccia strofinata tra i capelli. Quando allontaniamo la cannuccia, la striscia resta sollevata. Carichiamo un'altra cannuccia positivamente, come nell'Esperimento 5.15. Portiamo lentamente questa seconda cannuccia vicino all'elettroscopio, impedendone però il contatto. In questo caso tra di loro c'è attrazione. Questa attrazione è così forte che possiamo persino indurre la striscia a salire oltre il bordo superiore dell'elettroscopio, facendole seguire la cannuccia positiva (Figura 6.9)!

### Esperimento 6.7

Carichiamo due elettroscopi strisciando cannucce strofinate tra i capelli, come nell'Esperimento 6.2. Allontaniamo le cannucce e le strisce rimangono sollevate. Mettiamo questi due elettroscopi ormai caricati uno di fronte all'altro, in piani paralleli, con entrambe le strisce sollevate l'una verso l'altra. Avviciniamo lentamente gli elettroscopi tra loro, senza che le strisce vengano in contatto. Osserviamo che esse tendono ad allontanarsi l'una dall'altra, con ognuna di esse che recede verso il rettangolo del proprio elettroscopio.

Questo mostra ancora una volta la repulsione tra cariche dello stesso segno.

### Esperimento 6.8

Carichiamo un elettroscopio negativamente strisciandogli sopra una cannuccia strofinata tra i capelli, come nell'Esperimento 6.2. Un altro elettroscopio è caricato positivamente strisciandolo con un'altra cannuccia strofinata tra due tubi di gomma dura. Allontaniamo le cannucce e le strisce rimangono sollevate. Questi due elettroscopi vengono posti in parallelo, di fronte, con le strisce rivolte l'una verso l'altra. Muoviamo lentamente entrambi gli elettroscopi l'uno vicino all'altro, impedendo alle strisce di entrare in contatto. Questa volta si osserva che le strisce si attraggono, con ciascuna striscia che si allontana dal proprio cartoncino (Figura 6.10).

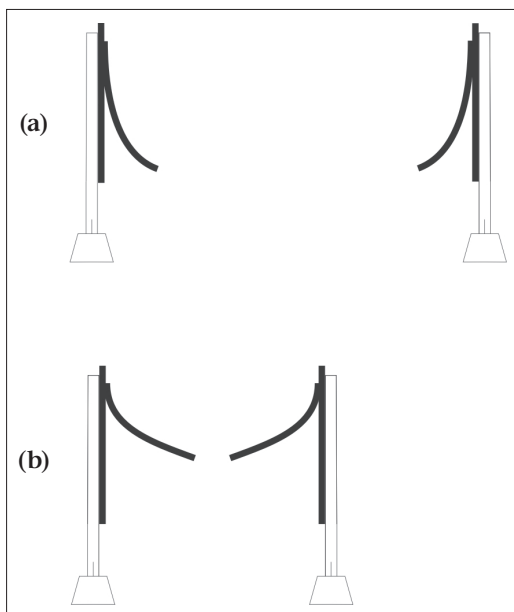
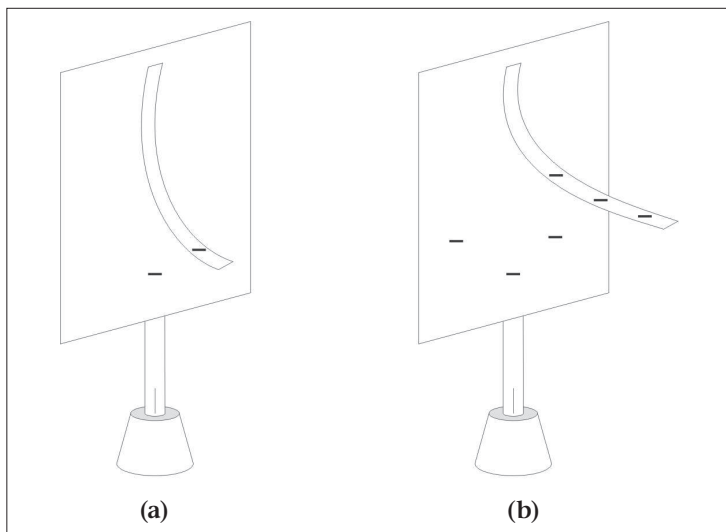



Figura 6.10. Attrazione tra le strisce di due elettroscopi di carica opposta.

### Esperimento 6.9

Iniziamo l'esperimento con un elettroscopio inizialmente scarico. Strofiniamo una cannuccia tra i capelli. Una piccola porzione della cannuccia strofinata tocca il bordo superiore dell'elettroscopio e striscia contro di esso, come nell'Esperimento 6.2. Osserviamo che la striscia si solleva dall'elettroscopio di un angolo $\vartheta_1$.

Senza toccare il cartoncino dell'elettroscopio o la striscia di carta, strisciamo nuovamente la cannuccia strofinata sul bordo superiore dell'elettroscopio. Quando allontaniamo la cannuccia, la striscia rimane sollevata, ma ora è inclinata di un angolo $\vartheta_2$ maggiore di $\vartheta_1$. Cioè, $\vartheta_2 > \vartheta_1$. Ciò è mostrato nella Figura 6.11.

Figura 6.11. L'angolo di spostamento di una striscia rispetto all'elettroscopio è una misura della quantità di carica su di esso.

Questa procedura può essere ripetuta qualche altra volta. Nel corso di essa la cannuccia deve essere strofinata una o più volte tra i capelli.

Questo esperimento indica che l'elettroscopio può essere usato per misurare la quantità di carica, secondo le definizioni della Sezione 5.7. Cioè, aumentando la quantità di carica su di esso, aumentiamo l'angolo tra la striscia e il rettangolo.

Un altro modo di illustrare questo effetto può essere visto con l'elettroscopio classico. Aumentando la sua quantità di carica, aumentiamo l'angolo di separazione delle sue due foglie (Figura 6.12).

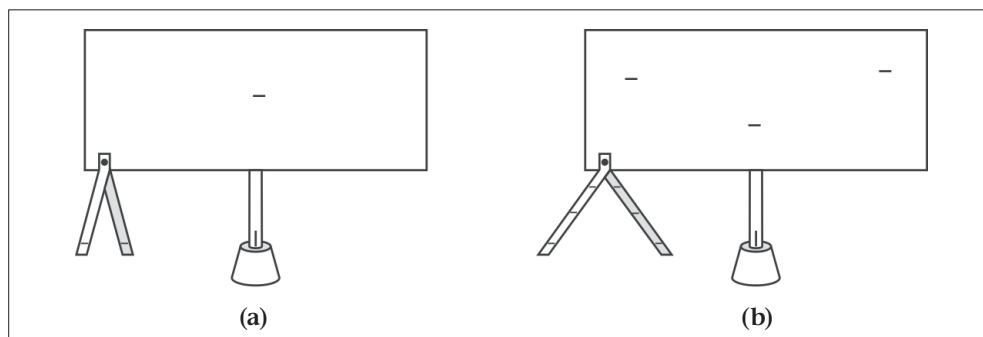



Figura 6.12: L'angolo tra le due foglie di un elettroscopio è una misura della quantità di carica presente su di esso.

## 6.3 Quali corpi scaricano un elettroscopio per contatto?

### Esperimento 6.10

Abbiamo visto nell'Esperimento 6.4 che quando tocchiamo col nostro dito un elettroscopio carico, l'elettroscopio viene immediatamente scaricato. Carichiamolo ancora una volta come nell'Esperimento 6.2. Teniamo una delle estremità di una cannuccia di plastica neutra con la nostra mano e tocchiamo il bordo superiore dell'elettroscopio carico con l'altra estremità. In questo caso non succede nulla alla striscia, che rimane sollevata (Figura 6.13). Concludiamo che una cannuccia di plastica neutra non rimuove la carica dall'elettroscopio.

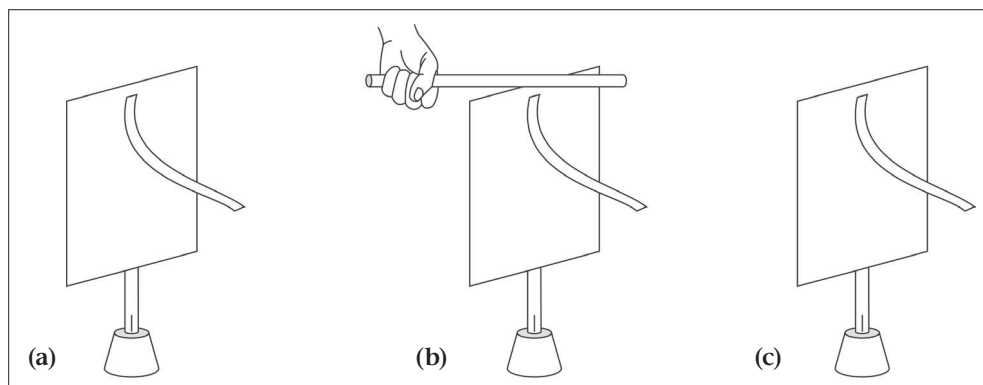



Figura 6.13. **(a)** Un elettroscopio inizialmente carico. **(b)** Teniamo una delle estremità di una cannuccia di plastica neutra con la nostra mano e tocchiamo il bordo superiore dell'elettroscopio con l'altra estremità della cannuccia. Non succede niente alla striscia. **(c)** Quando togliamo la cannuccia, la striscia rimane sollevata. Ciò vuol dire che un elettroscopio elettrizzato non viene scaricato quando lo tocchiamo con una cannuccia di plastica neutra nella nostra mano.

**Esperimento 6.11**

Carichiamo di nuovo l'elettroscopio, come nell'Esperimento 6.2. Questa volta teniamo in mano una delle estremità di uno spiedino di legno. Tocchiamo il bordo superiore dell'elettroscopio carico con l'altra estremità dello stesso spedino. Osserviamo che la striscia scende immediatamente (Figura 6.14). Quando allontaniamo lo spiedino, la striscia rimane verticale. Concludiamo che l'oggetto di legno usato ha rimosso la carica sull'elettroscopio.

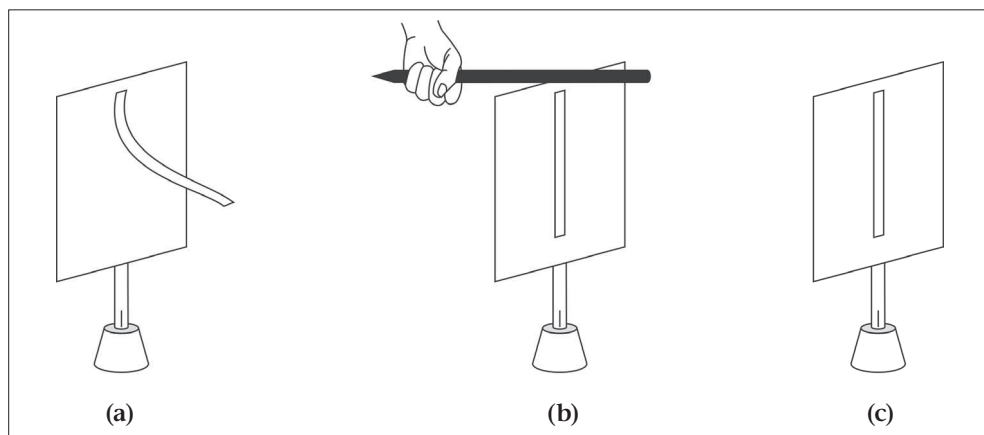



Figura 6.14. **(a)** Un elettroscopio inizialmente carico. **(b)** Teniamo in mano una delle estremità di un spiedino di legno e tocchiamo il bordo superiore dell'elettroscopio con l'altra estremità. La striscia scende immediatamente. **(c)** Quando allontaniamo lo spiedino, la striscia rimane giù. Ciò vuol dire che un elettroscopio elettrizzato viene scaricato quando lo tocchiamo con un pezzo di legno.

### 6.3.1 Definizioni di conduttori e isolanti

Gli Esperimenti 6.10 e 6.11 (Figure 6.13 e 6.14) introducono una distinzione fondamentale tra i materiali. Data l'importanza, sono stati attribuiti nomi specifici a ciascuno dei due gruppi di materiali in tal modo distinti.

**Definizioni**: I materiali che scaricano un elettroscopio elettrizzato semplicemente toccandolo sono chiamate *conduttori*. I materiali che non scaricano l'elettroscopio sono chiamati *isolanti*, *non conduttori* o *dielettrici*.

La scoperta di questi due tipi di sostanze fu fatta da Gray nel 1729. Egli scoprì anche alcune delle loro principali proprietà e pubblicò i suoi risultati in un lavoro fondamentale del 1731, di cui parleremo più in dettaglio nell'Appendice B[1]. Le espressioni *conduttore* e *isolante* sembrano essere dovute a Jean Théophile Desaguliers (1683-1744)[2]. Una delle citazioni di Desaguliers afferma[3]:

> Nel seguente resoconto, che è il seguito di precedenti esperimenti, chiamo *conduttori* quelle corde, ad una estremità delle quali viene applicato il tubo strofinato [di vetro]; e *sostenitori* quei corpi orizzontali su cui il *conduttore* poggia.

Prima di Desaguliers, Du Fay aveva già usato l'espressione *isolato* per riferirsi ad un conduttore sostenuto da corpi che non consentono all'elettricità di sfuggire attraverso di loro. Nel 1733 Du Fay discusse la trasmissione di elettricità lungo corde sospese con fili di seta, un fenomeno che era stato scoperto da Gray. In questo lavoro Du Fay disse quanto segue, nostra enfasi in corsivo[4]:

> Questo esperimento dimostra quanto sia necessario che la corda [conduttrice] utilizzata per trasmettere lontano l'elettricità, sia *isolata*, cioè, [la corda conduttrice dovrebbe essere] sospesa soltanto usando quei corpi che sono meno propensi di tutti a caricarsi di elettricità.

Nel 1737, egli disse ciò che segue, nostra enfasi in corsivo[5]:

> Pertanto, essendomi assicurato di questa uguaglianza per gli esperimenti che intendevo fare, ho utilizzato una sbarra di ferro, di sezione pari a un pollice quadrato [2,54 per 2,54 cm] e di lunghezza pari a quattro piedi [122 cm]. È stata, come ho detto, sospesa su fili di seta e *isolata*, in modo che nulla ha potuto deviare il vortice elettrico che fosse comunicato ad esso [dal tubo di vetro strofinato].

È possibile che l'espressione *isolante* abbia avuto le sue origini in queste citazioni da Du Fay. Nell'Appendice B discutiamo il lavoro di Gray in modo più dettagliato.

### Esperimento 6.12

Ora ripetiamo gli Esperimenti 6.10 e 6.11 per scoprire quali materiali sono conduttori e quali sono isolanti. La procedura sarà sempre la stessa. Carichiamo un elettroscopio strisciandolo con una cannuccia di plastica strofinata, come nell'Esperimento 6.2. Allontaniamo la cannuccia. Reggiamo quindi un certo oggetto con le nostre mani e tocchiamo il bordo superiore del rettangolo di cartoncino con qualche parte di questo oggetto. Se l'elettroscopio si scarica, diciamo che il materiale è conduttore, altrimenti diciamo che è isolante.

Questo esperimento può essere fatto con singoli fili di diversi materiali: cotone, seta, poliestere, poliammide sintetica, capelli, rame, ecc. Esso può anche essere fatto con materiali solidi come ad esempio metalli, legno, vetro, gomma, plastica, carta, carta velina, ecc.

In alcuni casi è più facile tenere in mano la cannuccia verticale di supporto dell'elettroscopio carico e quindi toccare l'angolo del cartoncino con il materiale di prova: un muro, una lavagna, un mobile, ecc. Come sempre, dobbiamo evitare di toccare con le mani il rettangolo di cartoncino e la sua striscia, per evitare la messa a terra elettrica attraverso il nostro corpo.

### Esperimento 6.13

La procedura descritta nel paragrafo finale dell'Esperimento 6.12 è anche appropriata per determinare quali liquidi sono conduttori o isolanti. Prima di cominciare questi test, si prende un recipiente vuoto che sarà successivamente riempito con diversi liquidi. Dobbiamo usare un recipiente conduttore. Per sapere se il recipiente è conduttore o isolante, carichiamo un elettroscopio e facciamo toccare il suo cartoncino con il recipiente. Se l'elettroscopio si scarica dopo questo contatto, ciò significa che il recipiente è davvero conduttore. Esempi di recipienti adatti sono quelli in metallo, vetro o legno. Possiamo quindi continuare con l'esperimento.

Inizialmente riempiamo completamente il contenitore con il liquido da sottoporre a test. Ora illustriamo ciò che accade con un liquido conduttore come l'acqua (Figura 6.15). In (a) abbiamo un elettroscopio elettrizzato. In (b) immergiamo un bordo dell'elettroscopio in acqua. Il cartone non deve toccare il recipiente, solo l'acqua. Osserviamo che la striscia scende. (c) Quando togliamo l'elettroscopio dall'acqua, la striscia rimane abbassata.

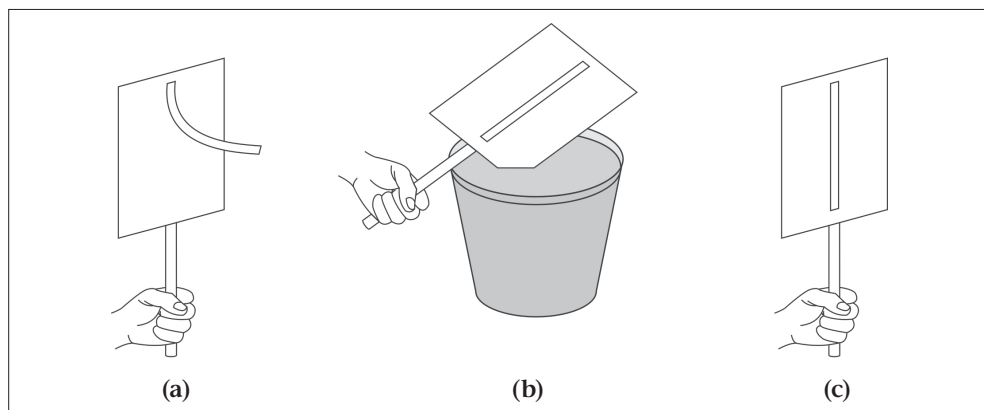



Figura 6.15 **(a)** Un elettroscopio inizialmente carico. **(b)** Immergiamo un bordo dell'elettroscopio in acqua. La sua striscia si abbassa. **(c)** Quando rimuoviamo l'elettroscopio dall'acqua, la striscia rimane abbassata.

In Figura 6.16 illustriamo ciò che accade nel caso di un liquido isolante, come l'olio vegetale da cucina. In (a) abbiamo un elettroscopio elettrizzato. Reggiamolo solo per la sua cannuccia di plastica onde evitare di toccare il cartoncino o la striscia sollevata. Immergiamo poi un bordo del cartoncino nel liquido. Il cartone non deve toccare il recipiente, solo l'olio. Osserviamo che la striscia resta sollevata, come in (b). Quando togliamo l'elettroscopio dal liquido, la sua striscia rimane sollevata, come in (c).

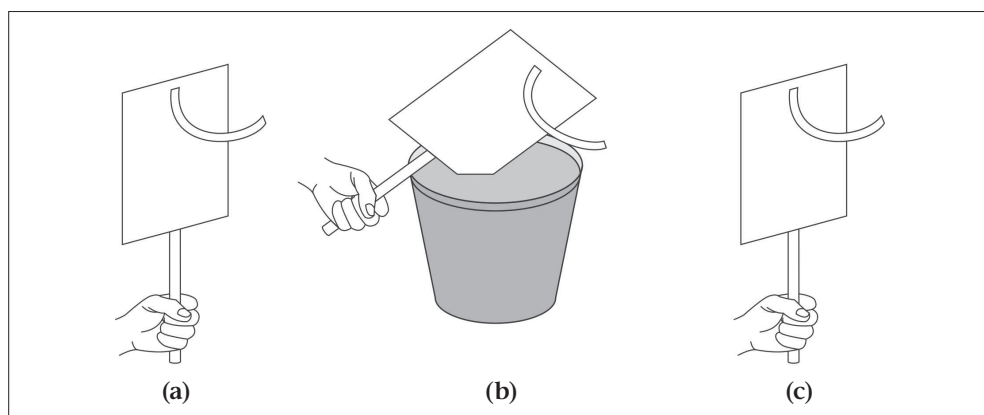



Figura 6.16. **(a)** Un elettroscopio inizialmente elettrizzato. **(b)** Immergiamo un bordo del cartone in un liquido isolante. La striscia rimane sollevata. **(c)** Quando togliamo l'elettroscopio dal liquido, la striscia rimane sollevata.

La stessa procedura può essere applicata anche per determinare se altre sostanze, ad esempio la farina di grano o di mais, sono conduttrici. Per far questo, riempiamo un recipiente conduttore con della farina. Immergiamo il bordo dell'elettroscopio carico nella farina e osserviamo il comportamento della sua striscia. Durante questa procedura è importante evitare di toccare il rettangolo di cartoncino o la sua striscia con il recipiente conduttore e con la mano al fine di evitare la scarica dell'elettroscopio.

### 6.3.2 Corpi che si comportano come conduttori e isolanti negli esperimenti usuali di elettrostatica

Al fine di fare una chiara distinzione tra conduttori e isolanti, la procedura ideale sarebbe quella di prendere in considerazione corpi tutti della stessa forma e dimensione. Per esempio, si potrebbe toccare l'elettroscopio con diversi cilindri della stessa lunghezza e diametro, ma fatti di materiali differenti. Ma per il momento, tuttavia, non ci preoccuperemo della forma o delle dimensioni dei corpi da testare.

Il risultato finale degli Esperimenti 6.10, 6.11, 6.12, e 6.13 eseguiti con diversi materiali è il seguente:

- **Conduttori in base agli esperimenti usuali di elettrostatica**:
  Aria umida, corpo umano, tutti i metalli, carta, cartoncino, carta velina, cotone, foglio di alluminio, legno, un pezzo di gesso, la maggior parte dei vetri a temperatura ambiente, porcellana, acqua dolce, alcool, shampoo, cherosene, latte, bevande analcooliche, detergente, parete, lavagna, sughero, cuoio, farina di frumento, farina di mais, filo in acrilico, sale, zucchero, segatura, terra o argilla, mattone, la maggior parte dei tipi di gomma, ecc.
- **Isolanti in base agli esperimenti usuali di elettrostatica:**
  Aria secca, ambra, plastica, PVC, seta, vetro riscaldato, nylon o poliammide sintetica, poliestere, lana, un singolo capello umano, tubo acrilico, polistirolo, una barretta di cioccolato, olio vegetale da cucina, caffè macinato e alcuni tipi di gomma.

Il numero di materiali conduttori è molto più grande del numero di quelli isolanti. Da queste due liste possiamo vedere che la maggior parte dei materiali sono conduttori, pochissimi sono isolanti. Alcuni dei conduttori sono molto buoni, scaricano quasi istantaneamente l'elettroscopio, come nel caso del corpo umano, dei metalli, del cotone, o della carta. Anche se il legno è un conduttore, non conduce tanto bene quanto il corpo umano. Questo è indicato dal tempo più lungo richiesto per scaricare l'elettroscopio quando lo tocchiamo con un legno, rispetto al tempo molto breve in cui esso viene scaricato quando tocchiamo l'elettroscopio con il nostro corpo o con un pezzo di metallo.

Il vetro deve essere considerato separatamente. La maggior parte dei vetri comuni scarica l'elettroscopio, anche se più lentamente dei metalli. D'altra parte, riscaldati sul fuoco o in un forno a microonde, essi possono comportarsi come isolanti. In altre parole, dopo essere stati riscaldati essi normalmente non scaricano l'elettroscopio o lo scaricano molto più lentamente rispetto a quanto succede a temperatura normale. Normalmente essi si comportano come conduttori a causa dell'umidità o del vapore acqueo accumulato sulla loro superficie. Quando il vetro viene riscaldato, l'acqua evapora e quindi si comporta come isolante. Molti vecchi scienziati, come Gray e Du Fay, usavano strofinare i tubi di vetro nei loro esperimenti, tenendoli nelle loro mani. I tubi si comportavano come isolanti. Essi spesso menzionano la necessità di riscaldare i tubi prima di sfregarli, poiché questa procedura di riscaldamento aumentava la quantità di carica che essi acquisivano. Essa faceva in modo che la carica acquisita durasse più a lungo sulla loro superficie. L'altra ragione per cui i loro vetri potevano comportarsi come isolanti era probabilmente la loro composizione chimica. Normalmente essi utilizzavano il vetro flint, che è una sorta di vetro che ha il piombo nella sua composizione. Questo tipo di vetro è molto più isolante rispetto alla maggior parte dei vetri presenti oggi nei negozi. Non è facile trovare vetri flint al giorno d'oggi, eccetto che in negozi specializzati.

Nelle giornate asciutte e fredde l'elettroscopio può rimanere carico per diversi minuti. In questo caso l'aria intorno all'elettroscopio si comporta come un buon isolante. Nei giorni caldi e umidi, invece, e in particolare nei giorni di pioggia, è difficile mantenere l'elettroscopio carico. Normalmente si scarica non appena è elettrizzato tramite strisciamento con una cannuccia strofinata. L'aria intorno si comporta come conduttore in queste situazioni. Per questo motivo la maggior parte degli esperimenti funziona bene nei

giorni asciutti, quando le cariche generate negli isolanti possono essere mantenute per tempi più lunghi. Anche le cariche situate nei conduttori elettricamente isolati dal terreno possono essere conservate più a lungo col tempo asciutto, rispetto al breve tempo in cui esse possono essere immagazzinate in giorni umidi. Nelle giornate umide molti esperimenti non funzionano come previsto, o gli effetti non sono così visibili o rilevabili.

Molti tipi di gomma si comportano come conduttori. Ciò può succedere a causa dell'umidità sulle loro superfici, della loro composizione chimica o per i loro processi di fabbricazione. Alcuni tipi di gomma si comportano come isolanti. Per questo motivo la procedura ideale è quella di testare tutti i materiali disponibili. Solo dopo un test come quello qui descritto possiamo classificarli in base al loro comportamento.

Dividere le sostanze in conduttori e isolanti è uno degli aspetti più importanti di tutta la scienza dell'elettricità. Insieme all'esistenza di cariche positive e negative, con attrazioni e repulsioni, questo fatto permette di comprendere tutta una serie di fenomeni.

## 6.4 Quali corpi caricano un elettroscopio per contatto?

### Esperimento 6.14

Due elettroscopi inizialmente scarichi sono posti in parallelo, uno di fronte all'altro, con le strisce verso l'esterno. Tra di loro deve esserci una distanza di circa 15 cm. Una cannuccia di plastica neutra è posta al di sopra dei cartoncini degli elettroscopi, appoggiata ad essi come in Figura 6.17.

Dopo questa preparazione, prendiamo una seconda cannuccia, elettrizzata per attrito tra i nostri capelli.

Questa seconda cannuccia strofinata è strisciata con il cartoncino dell'elettroscopio *I* di Figura 6.17. Osserviamo che solo la striscia dell'elettroscopio *I* si alza, mentre la striscia dell'elettroscopio *II* non si muove. Questa sequenza di procedure è illustrata in Figura 6.18.

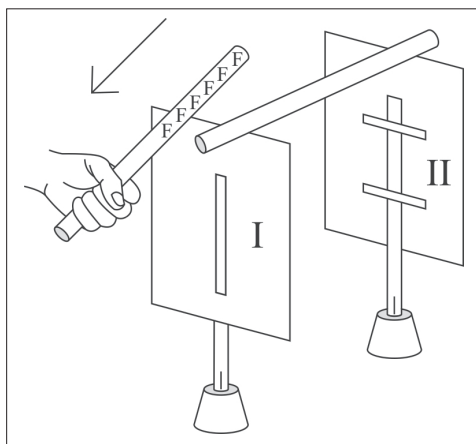



Figura 6.17. Due elettroscopi inizialmente scarichi con le strisce all'esterno. Essi sono collegati da una cannuccia neutra. Una seconda cannuccia carica è strisciata contro il cartoncino dell'elettroscopio I.

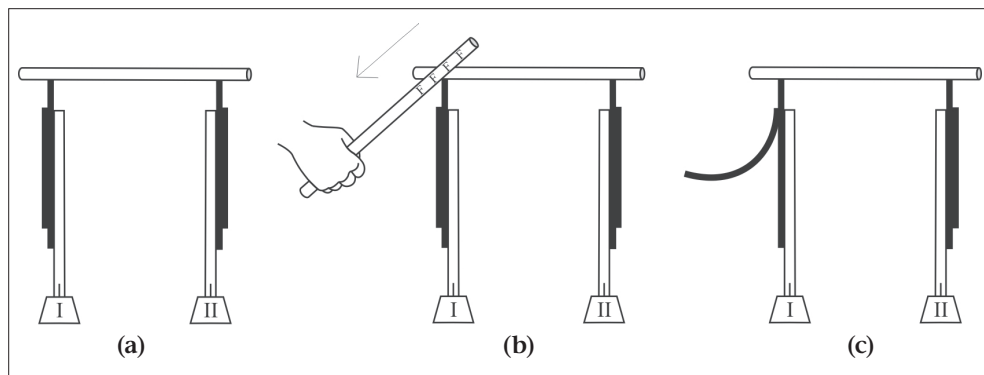



Figura 6.18. **(a)** Due elettroscopi inizialmente scarichi collegati attraverso una cannuccia neutra. **(b)** Una seconda cannuccia elettrizzata è strisciata contro il bordo superiore dell'elettroscopio *I*. **(c)** La cannuccia carica viene rimossa. Osserviamo che solo la striscia dell'elettroscopio *I* si alza.

### Esperimento 6.15

La procedura dell'Esperimento 6.14 viene ripetuta. Ma ora i due elettroscopi, inizialmente neutri, sono collegati mediante uno spiedino da barbecue di legno (Figura 6.19).

Figura 6.19. Due elettroscopi inizialmente scarichi sono collegati da uno spiedino di legno. Una cannuccia elettrizzata è strisciata solo contro l'elettroscopio *I*.

Una cannuccia elettrizzata è strisciata solo contro l'elettroscopio *I* di Figura 6.19. In questo caso si osserva che entrambe le strisce si alzano. Questa sequenza di procedure è illustrata in Figura 6.20.

Gli Esperimenti 6.14 e 6.15 sono l'opposto degli Esperimenti 6.4, 6.10, 6.11, e 6.12. In questi casi si è visto quali corpi scaricavano o meno un elettroscopio elettrizzato, toccandolo con questo materiale in mano. Ora stiamo analizzando quali materiali caricano o meno l'elettroscopio *II* inizialmente scarico, quando lo connettiamo, mediante essi, all'elettroscopio *I* che è stato caricato in precedenza, strisciandolo con una cannuccia elettrizzata. Il risultato è lo stesso. Cioè, una cannuccia di plastica neutra non scarica un elettroscopio elettrizzato quando essi si toccano, come nell'Esperimento 6.10. Inoltre essa non carica l'elettroscopio *II* se funge da collegamento materiale tra gli elettroscopi *I* e *II*, quando l'elettroscopio *I* è caricato strisciandolo con una cannuccia elettrizzata, come nell'Esperimento 6.14. Al contrario, in questo caso, uno spiedino di legno carica l'elettroscopio *II*, come nell'Esperimento 6.15.

Figura 6.20. **(a)** Due elettroscopi inizialmente scarichi collegati da uno spiedino di legno. **(b)** Si striscia solo l'elettroscopio *I* con una cannuccia elettrizzata. **(c)** La cannuccia elettrizzata viene rimossa. Osserviamo che entrambi gli elettroscopi sono stati caricati.

### Esperimento 6.16

Gli Esperimenti 6.14 e 6.15 possono essere facilmente applicati ad altri materiali. Possiamo, per esempio, collegare i bordi superiori dei due elettroscopi con un cavo o filo (di cotone, poliestere, rame, ecc..), tramite un bastoncino (di legno, metallo, plastica, PVC, ecc..), tramite una striscia (di carta, di alluminio, di carta velina, tela, ecc..), e così via. Dopodiché, strofiniamo una cannuccia di plastica. Utilizziamo allora questa plastica strofinata per caricare il primo elettroscopio strisciandolo con essa, come descritto

nell'Esperimento 6.2. Durante questo processo osserviamo il comportamento del secondo elettroscopio. Se la striscia di questo secondo elettroscopio non si muove e rimane puntata verso il basso, ciò significa che il materiale che collega i due elettroscopi non ha permesso il trasferimento di cariche. Perciò, è un isolante. Al contrario, se la striscia del secondo elettroscopio si allontana da esso, e rimane sollevata, ciò significa che tra i due elettroscopi c'è stato un trasferimento di cariche. Parte della carica accumulata nel primo elettroscopio è stata quindi condotta al secondo elettroscopio attraverso il materiale di collegamento. Eseguendo questo esperimento, osserviamo che i materiali considerati isolanti nell'Esperimento 6.12 non permettono al secondo elettroscopio di caricarsi. Al contrario, quelli considerati come conduttori nell'Esperimento 6.12 permettono al secondo elettroscopio, in questo esperimento, di caricarsi.

## 6.5 Componenti fondamentali di un versorium, un pendolo elettrico e un elettroscopio

Ora che conosciamo la distinzione tra conduttori e isolanti, insieme alle loro proprietà principali, possiamo comprendere la struttura degli strumenti costruiti finora.

Nel caso di un versorium di metallo abbiamo un ago conduttore orizzontale (come il fermacampione per carta in acciaio) (Figure 3.4 e 6.21 (a)). Di solito esso è supportato su uno spillo verticale, conduttore, infisso a sua volta su una tavola di legno o su un sughero. Ciò vuol dire che tutti gli elementi di questo versorium sono conduttori. Il versorium di plastica ha un cappello isolante (Figure 3.5 e 6.21 (b)). Il versorium di Du Fay, al contrario, è composto da un cappello di plastica isolante, ed ha un conduttore in una delle sue punte, un ritaglio di alluminio per alimenti (Figure 4.22 e 6.21 (c)).

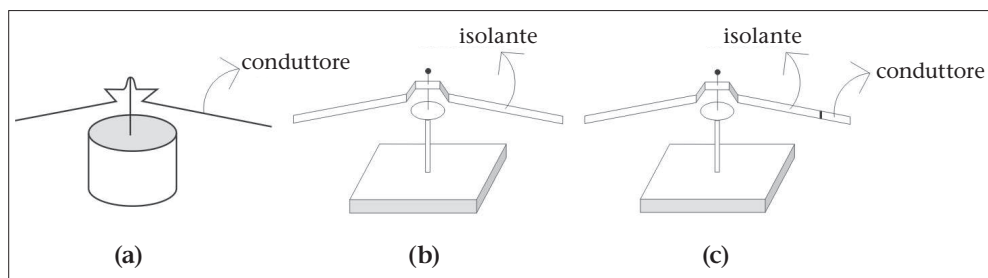



Figura 6.21. Componenti di un versorium. **(a)** Versorium di metallo. **(b)** Versorium di plastica. **(c)** Versorium di Du Fay.

Il pendolo elettrico è costituito da un filo di seta isolante con un conduttore alla sua estremità inferiore, il disco di carta (Figura 6.22). Il filo di seta è di fondamentale importanza. È questo filo, insieme con le cannucce di plastica che compongono il pendolo, ad impedire che la carica acquisita con il metodo ACR si scarichi a terra. Se non fosse per questo filo di seta e per le cannucce di plastica, il disco di carta non potrebbe rimanere carico dopo il contatto con un materiale strofinato. Se il disco di carta fosse legato, per esempio, ad un filo di cotone sorretto da uno spiedino di legno, non

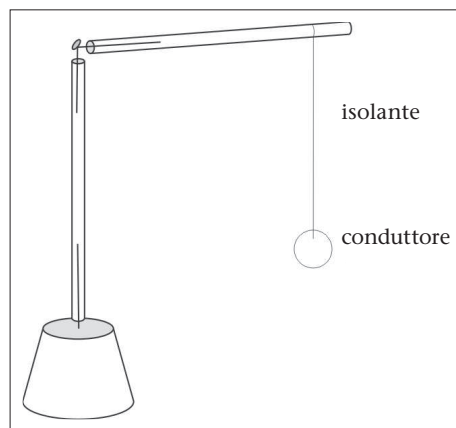



Figura 6.22. Componenti di un pendolo elettrico.

saremmo in grado di vedere il meccanismo di attrazione, contatto, e repulsione.

Anche i fili di nylon (poliammide sintetica) e poliestere si comportano come isolanti. Quindi possiamo usare questi fili per fare un pendolo elettrico. Ma non dovremmo usare un filo di cotone.

L'elettroscopio, invece, è composto da due conduttori, il rettangolo di cartoncino e la striscia di carta velina, sostenuti da un isolante, la cannuccia di plastica (Figura 6.23). Questo materiale plastico è fondamentale. È la proprietà isolante della plastica che impedisce la scarica a terra di un elettroscopio elettrizzato.

Se avessimo uno spiedino di legno al posto di un pezzo di plastica, l'elettroscopio si scaricherebbe sempre a terra dopo essere stato strisciato con una cannuccia strofinata. Pertanto, non sarebbe possibile mantenerlo elettrizzato dopo essere stato caricato.

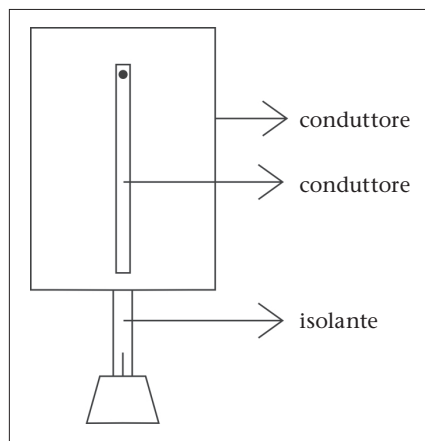



Figura 6.23. Componenti di un elettroscopio.

## 6.6 Influenza della differenza di potenziale elettrico sul comportamento da conduttore o da isolante di un corpo

Negli Esperimenti 6.4, 6.10 e 6.12 i materiali sono stati classificati come conduttori (isolanti) se scaricavano (non scaricavano) un elettroscopio elettrizzato.

Un altro modo per fare questa classificazione è quello di osservare se i materiali scaricano o meno una batteria elettrica.

**Definizioni**: I materiali che scaricano una batteria tramite una connessione del terminale positivo della batteria con il suo terminale negativo sono chiamati *conduttori*. I materiali che non scaricano la batteria sono chiamati *isolanti*. Vediamo come fare questa classificazione.

### Esperimento 6.17

I materiali utilizzati in questo esperimento sono rappresentati in Figura 6.24. Utilizziamo tre pezzi di filo di rame isolato, col rame esposto alle loro estremità (Figura 6.24 (a)). Ed una batteria alcalina nuova grande, di tipo D (torcia), che generi una differenza di potenziale di 1,5 volt tra i suoi poli (Figura 6.24 (b)). È anche utile impiegare un supporto per batteria, al fine di facilitare le connessioni elettriche con i fili. Utilizziamo pure una piccola lampadina da 1,5 volt e il suo portalampada. È anche utile un interruttore, sebbene non sia essenziale (Figura 6.24 (c)). Questi elementi possono essere trovati nei negozi specializzati in elettricità ed elettronica.

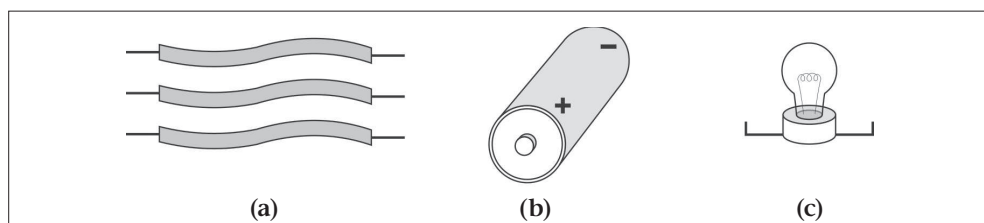



Figura 6.24. **(a)** Tre pezzi di filo di rame isolato (con le estremità esposte). **(b)** Una batteria di tipo D nuova. **(c)** Una lampadina da 1,5 volt e il suo portalampada.

Un'estremità non isolata del primo filo viene collegata al terminale negativo della batteria. L'altra estremità invece sarà sagomata a forma di uncino come in Figura 6.25. Essa sarà chiamata *A*. Il secondo filo viene collegato con un estremo al terminale positivo della batteria, mentre l'altro viene collegato ad uno dei terminali del portalampada. Un'estremità del terzo filo viene collegata all'altro terminale del portalampada, l'altra estremità, invece, sarà modellata a forma di uncino, che chiameremo *B*. La distanza tra *A* e *B* deve essere di circa 10 cm (Figura 6.25).

Figura 6.25. Circuito di prova.

Quando tutto è pronto, prendiamo un quarto pezzo di filo di rame, non isolato alle estremità. Un'estremità di questo quarto filo è collegata ad *A* ed un'altra estremità a *B*. La lampadina dovrebbe accendersi. Questo indica che i collegamenti elettrici o i contatti sono stati eseguiti correttamente. Inoltre, questo indica che vi è una corrente elettrica attraverso i fili e la lampadina, come illustrato nella Figura 6.26.

Figura 6.26. Quando le estremità non isolate di un filo di rame sono collegate alle estremità *A* e *B*, la lampadina si accende.

Poiché la lampadina si accende, si dice che il filo di rame è un conduttore di elettricità quando è sottoposto ad una differenza di potenziale di 1,5 volt = 1,5 V.

Se la lampadina è tenuta accesa per diversi minuti, la batteria si indebolisce. Questo viene indicato dall'intensità della luce, che prima diminuisce e poi si azzera. Quando questo accade la batteria si è scaricata. Per evitare che si scarichi, l'opzione migliore è quella di aprire il contatto (cioè rimuovere il quarto filo) non appena la lampadina si accende.

## Esperimento 6.18

Prima di eseguire la procedura successiva, è essenziale assicurarsi che l'Esperimento 6.17 funzioni correttamente con ciascuno dei materiali che useremo. Questo indicherà che tutti i contatti elettrici sono ben fatti. Noi supporremo che sia proprio così. Assumeremo anche che la batteria sia ancora nuova e carica dopo che il quarto filo è stato rimosso.

Ora colleghiamo i punti *A* e *B* con una cannuccia di plastica. Quando facciamo questo, la lampadina non si accende. Ciò indica che nessuna corrente elettrica sta fluendo attraverso il circuito (Figura 6.27 (a)).

Figura 6.27. **(a)** La lampadina non si accende quando colleghiamo *A* e *B* con una cannuccia di plastica. **(b)** La lampadina rimane spenta anche quando *A* e *B* sono collegati con uno spiedino di legno.

**Definizione:** la plastica è un materiale isolante quando è sottoposto ad una differenza potenziale di 1,5 volt. La ragione di questa definizione è che essa non consente la scarica della batteria quando essa connette i suoi terminali positivo e negativo. Questo è indicato dal fatto che la lampadina non si accende quando *A* e *B* sono collegati con una cannuccia di plastica.

**Esperimento 6.19**

Ripetiamo l'Esperimento 6.17 ma ora colleghiamo *A* e *B* con altri materiali.

Per comodità si potrebbe mettere un interruttore opzionale a metà del primo o del secondo filo. Con questo interruttore si può aprire o chiudere il circuito elettrico quando si vuole. Apriamo l'interruttore e posizioniamo il materiale da testare tra *A* e *B*. Chiudiamo quindi l'interruttore e osserviamo la lampadina.

**Definizioni:** Quando la luce si accende, il materiale è chiamato conduttore. Quando la luce non si accende, il materiale è chiamato isolante. Possiamo testare tutti i materiali elencati nell'Esperimento 6.12.

Ciò è illustrato nella Figura 6.27 (b) dove *A* e *B* sono collegati con un spiedino di legno. In questo caso la lampadina non si accende. Secondo le nostre definizioni, questo indica che il legno è isolante quando è sottoposto ad una differenza di potenziale di 1,5 volt, anche se lo spiedino di legno è un conduttore a tensioni molto superiori.

**Esperimento 6.20**

Il modo migliore per testare liquidi è di procurarsi un recipiente isolante (come un bicchiere di plastica, per esempio). Inizialmente esso deve essere vuoto. Per verificare se sia davvero isolante, colleghiamo *A* e *B* con questo recipiente vuoto. Supporremo che la luce non si accenda, indicando che esso è isolante a 1,5 volt.

Il bicchiere di plastica viene poi riempito con il liquido in esame. Dopo questo, i terminali *A* e *B* sono immersi nel liquido. In Figura 6.28 illustriamo ciò che accade con acqua dolce di rubinetto o acqua piovana.

Ciò che succede è che la luce non si accende, indicando che l'acqua dolce è isolante quando è sottoposta ad una differenza di potenziale di 1,5 volt.

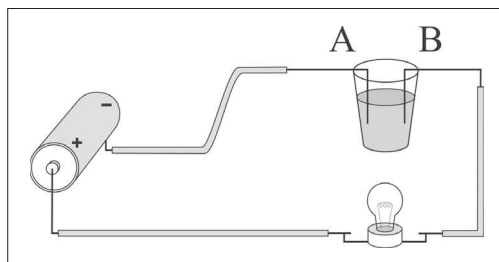



Figura 6.28. La lampadina non si accende quando *A* e *B* sono collegati con l'acqua dolce.

### 6.6.1 Materiali che si comportano come conduttori e isolanti per piccole differenze di potenziale

Eseguiamo diversi test analoghi agli Esperimenti dal 6.17 al 6.20. Il risultato finale è il seguente:

- **Materiali che si comportano come conduttori quando sono sottoposti ad una differenza di potenziale di 1,5 V:**
  Tutti i metalli.
- **Materiali che si comportano come isolanti quando sono sottoposti ad una differenza di potenziale di 1,5 V:**
  Aria secca, aria umida, ambra, plastica, seta, legno, vetro riscaldato, vetro a temperatura ambiente, nylon o poliammide sintetica, PVC, poliestere, lana, capelli umani, tubo acrilico, panno acrilico, polistirolo, una barretta di cioccolato, caffè macinato, carta, cartoncino, carta velina, un pezzo di gesso, porcellana, acqua dolce, alcool,

shampoo, kerosene, latte, bevande analcoliche, detergenti, olio vegetale da cucina, muro, lavagna, sughero, cuoio, farina di frumento, farina di mais, filo in acrilico, sale, zucchero, segatura, terra o argilla, mattoni, gomma, ecc.

Possiamo confrontare i risultati di questo esperimento con gli Esperimenti 6.12 e 6.13. La conclusione è che i concetti di *conduttore* e *isolante* sono relativi. Ciò significa che materiali come vetro e legno che si comportavano come conduttori negli esperimenti usuali di elettrostatica, ora si comportano come isolanti quando sono sottoposti ad una differenza di potenziale di 1,5 V. Non entreremo nei dettagli qui, ma in elettrostatica è comune lavorare con differenze di potenziale che vanno da 1000 volt a 10000 volt (cioè tra $10^3$ V e $10^4$ V). La differenza di potenziale a cui ci si riferisce qui è quella tra il corpo carico (come un pezzo di plastica strofinato o un elettroscopio carico) e il suolo; o tra le estremità di un corpo (quando si vuole verificare se questo corpo si comporta come conduttore o isolante). In questi casi, la maggior parte dei materiali si comportano come conduttori, come abbiamo visto in precedenza. La differenza di potenziale generata tra i poli di comuni pile o batterie chimiche, invece, è molto più bassa, dal momento che varia tra 1 e 10 V. Per queste basse differenze di potenziale molti materiali come legno, carta, gomma, e vetro, si comportano come isolanti. Questo dimostra che dobbiamo essere molto attenti a classificare gli oggetti come conduttori o isolanti. Dopo tutto, il comportamento di tutte le sostanze dipende non solo dalle loro proprietà intrinseche, ma anche dalla differenza di potenziale esterna a cui sono sottoposte. Questo è un aspetto molto importante che dovrebbe essere sempre tenuto a mente.

C'è una gradualità tra i soliti esperimenti di elettrostatica e gli esperimenti per i quali esiste una differenza di potenziale di pochi volt. In altre parole, vi è una gradualità nelle proprietà dei corpi conduttori e isolanti quando si passa da una differenza di potenziale di 10000 V ad una differenza di potenziale di pochi volt.

A causa di questo fatto, potrebbe essere opportuno cambiare la nostra terminologia. Normalmente diciamo che un certo corpo *A è* un conduttore, mentre un altro corpo *B è* un isolante. Tuttavia, da quanto appena visto, sarebbe più corretto dire che in un certo insieme di condizioni il corpo *A si comporta come* un conduttore, mentre in un'altra serie di condizioni *si comporta come* un isolante. Lo stesso sarebbe valido per il corpo *B*. Ma questo sarebbe molto lungo e complicato. Per questo motivo manterremo la procedura usuale di dire che i corpi *sono* conduttori o isolanti. Ma dovrebbe essere chiaro a tutti che questi sono concetti relativi, che dipendono non solo dalle proprietà intrinseche di questi corpi, ma anche dalle condizioni esterne a cui essi sono soggetti.

## 6.7 Altri aspetti che influiscono sulle proprietà conduttive e isolanti di un materiale

I conduttori sono stati definiti nella Sottosezione 6.3.1 come i materiali che scaricano un elettroscopio elettrizzato quando tocchiamo l'elettroscopio con essi. Gli isolanti, invece, sono stati definiti come i materiali che non fanno scaricare un elettroscopio elettrizzato quando tocchiamo l'elettroscopio con essi. Nella Sezione 6.6 abbiamo visto che queste definizioni sono relative. Dopotutto, a seconda della differenza di potenziale elettrico che agisce sulle estremità di un materiale, esso può comportarsi come conduttore o isolante. In questa Sezione accenneremo brevemente ad altri tre aspetti che pure influiscono su queste definizioni.

### 6.7.1 Il tempo necessario a scaricare un elettroscopio elettrizzato

**Esperimento 6.21**

Carichiamo un elettroscopio in una giornata asciutta e lasciamolo su un tavolo. Osserviamo che la striscia rimane sollevata per alcuni secondi o anche per pochi minuti.

Però, se aspettiamo per un tempo sufficientemente lungo, per esempio un'ora, l'elettroscopio si sarà completamente scaricato.

Questo significa che le definizioni di conduttore e di isolante della Sottosezione 6.3.1 dipendono dal tempo di osservazione. Per un intervallo di tempo di pochi secondi, l'aria secca può essere considerata come un buon isolante. Per un intervallo di tempo di un'ora, invece, l'aria secca può essere classificata come un conduttore, in quanto permette la scarica di un elettroscopio.

**Definizioni**: Nelle definizioni qui presenti ci stiamo riferendo alle procedure sperimentali descritte nella Sezione 6.3. Per gli scopi di questo libro, possiamo definire come *buoni conduttori* i materiali che scaricano un elettroscopio elettrizzato quando entrano in contatto con esso durante un intervallo di tempo inferiore a 5 secondi. *Cattivi conduttori* o *cattivi isolanti* sono quelli che scaricano l'elettroscopio durante un intervallo di tempo che va da 5 secondi fino a 30 secondi. Questi corpi sono anche chiamati *conduttori imperfetti* o *isolanti imperfetti*. Infine, *buoni isolanti* sono i materiali che richiedono un intervallo di tempo maggiore di 30 secondi per scaricare un elettroscopio elettrizzato.

### 6.7.2 La lunghezza di una sostanza che viene a contatto con un elettroscopio elettrizzato

**Esperimento 6.22**

Tagliamo diverse strisce di carta di 2 cm di larghezza e con lunghezze variabili da 10 cm fino a 1 m. In una giornata asciutta, carichiamo un elettroscopio e lasciamolo su un tavolo. Reggiamo l'estremità della striscia di 10 centimetri con la nostra mano e tocchiamo con la sua estremità libera il bordo del cartoncino dell'elettroscopio. Osserviamo una rapida scarica dell'elettroscopio. Secondo la definizione della Sottosezione 6.7.1, questo significa che la striscia può essere considerata come buon conduttore.

Carichiamo ancora una volta l'elettroscopio e ora utilizziamo una striscia di carta di 30 cm × 2 cm. Con la nostra mano reggiamo una estremità della striscia di carta mentre la sua estremità libera tocca il cartoncino dell'elettroscopio. Ora possiamo facilmente notare che l'intervallo di tempo necessario all'elettroscopio per scaricarsi è di alcuni secondi. A seconda del tipo di carta, questa striscia lunga 30 cm può essere considerata come un cattivo conduttore.

Questo esperimento dimostra chiaramente inoltre che, con il passare del tempo, aumenta la quantità di carica persa da un elettroscopio elettrizzato (vedi la Sottosezione 6.7.1). L'unica differenza è che nella situazione attuale l'elettroscopio si è scaricato principalmente attraverso la striscia di carta e non attraverso l'aria circostante.

L'elettroscopio è caricato ancora una volta e l'esperimento ripetuto con una striscia di carta di 1 m di lunghezza e 2 cm di larghezza. Osserviamo ora che l'elettroscopio rimane carico per molti secondi. Secondo la definizione della Sottosezione 6.7.1, ciò significa che questa striscia di carta lunga 1 m può essere considerato un buon isolante.

Questo esperimento dimostra che la lunghezza di un materiale influenza il suo comportamento da conduttore o isolante. Aumentando la lunghezza di una sostanza tra la nostra mano e il cartone dell'elettroscopio, aumentiamo la quantità di tempo necessario per scaricare l'elettroscopio.

### 6.7.3 L'area della sezione trasversale di una sostanza che viene a contatto con un elettroscopio elettrizzato

**Esperimento 6.23**

Carichiamo un elettroscopio e lasciamolo su un tavolo. Reggiamo con la nostra mano l'estremità di un singolo capello umano e tocchiamo con l'altra estremità del capello il

cartoncino di un elettroscopio elettrizzato. Osserviamo che l'elettroscopio rimane carico per diversi secondi. Ciò indica che siamo in grado di classificare un singolo capello umano come buon isolante.

Carichiamo l'elettroscopio di nuovo e aumentiamo il numero di capelli che abbiamo in mano, ponendo le loro estremità libere contemporaneamente a contatto col cartoncino dell'elettroscopio. Osserviamo che aumentando il numero di capelli, la scarica diventa più veloce. Per esempio, con dozzine di capelli l'elettroscopio si scarica in pochi secondi. Possiamo quindi classificare tale quantità di capelli come buon conduttore.Esperimenti come questo mostrano che l'area della sezione trasversale di un corpo ha un'influenza sulle sue proprietà conduttive o isolanti. Più grande è quest'area tra la nostra mano e il cartone dell'elettroscopio, minore sarà il tempo necessario per scaricare l'elettroscopio.

In questo libro tralasceremo di discutere in maggiore dettaglio gli aspetti presentati nelle Sezioni 6.6 e 6.7.

## 6.8 Elettrizzare un conduttore per strofinio

### Esperimento 6.24

Abbiamo visto nell'Esperimento 2.11 che non si può caricare un metallo per strofinio mentre lo reggiamo con le nostre mani. Ora che abbiamo scoperto la distinzione tra conduttori e isolanti, insieme con il fatto che il corpo umano è un conduttore, possiamo provare una variazione di questo esperimento. In verità, è possibile che il metallo abbia acquisito una carica quando l'abbiamo strofinato, ma che questa carica si sia immediatamente scaricata a terra attraverso il nostro corpo. Con il nuovo esperimento che stiamo per eseguire possiamo concludere se è stato davvero così.

Questa volta reggiamo il metallo all'estremità di un tubo in PVC lungo 30 cm. Il metallo potrebbe essere, per esempio, un bollitore in alluminio. Il bollitore è retto a testa in giù con il tubo in PVC, con una sua estremità infilata in esso. Carichiamo un pendolo elettrico negativamente e un altro positivamente, come nella Sezione 5.4. Questi due pendoli carichi sono tenuti separati l'uno dall'altro.

Reggiamo il tubo con una mano, senza toccare il metallo. Avvolgiamo un sacchetto di plastica sull'altra mano e strofiniamo questa plastica contro una porzione del bollitore. Sempre tenendo il tubo in PVC con una mano e senza toccare il metallo, portiamo ora la parte del bollitore di alluminio che è stata strofinata presso i due pendoli con cariche opposte, impedendo sempre che venga a contatto con i dischi di carta carichi dei pendoli. Portiamo poi la parte strofinata del sacchetto di plastica vicino ai due pendoli di carica opposta, ancora una volta impedendo che vengano a contatto. Osservando l'attrazione e la repulsione tra questi materiali e i pendoli, troveremo che la plastica è diventata negativamente carica, mentre il bollitore in alluminio è diventato positivamente carico.

### Esperimento 6.25

Ripetiamo le procedure dell'Esperimento 6.24, ma ora consideriamo una porzione non strofinata del sacchetto di plastica lontana da quella strofinata. Quando l'avviciniamo ai due pendoli carichi, questi non indicano la presenza di una carica risultante su di essa. Invece, qualsiasi parte del bollitore isolato influenzerà i pendoli quando viene avvicinato ad essi. Questo succede sia se la parte del bollitore accostata ai pendoli è vicina a quella strofinata, sia se ne è lontana. Vale a dire che tutte le parti del bollitore si comporteranno come se fossero positivamente cariche.

Esperimenti come questo dimostrano che siamo in grado di elettrizzare un conduttore per attrito, purché il conduttore sia isolato durante questa procedura.

La scoperta che anche i metalli possano essere caricati per attrito, purché siano ben isolati, non era stata fatta fino al 1770 circa[6].

## 6.9 Conservazione della carica elettrica

### Esperimento 6.26

Prendiamo un tubo in PVC neutro insieme ad un pezzo di sacchetto di plastica altrettanto neutro, come negli Esperimenti 2.1, 3.1 e 4.5. Carichiamo un pendolo elettrico negativamente e un altro positivamente, come nella Sezione 5.4. Strofiniamo poi il sacchetto di plastica sul tubo in PVC. Portiamo ora lentamente la parte strofinata del tubo vicino ad ognuno dei pendoli carichi, impedendo il contatto tra il tubo ed entrambi i pendoli. Possiamo così concludere che esso è diventato carico negativamente, in quanto esso respinge il pendolo negativo e attira quello positivo. Portando lentamente la parte del sacchetto di plastica strofinata vicino a ciascuno dei pendoli carichi e impedendo sempre loro di entrare in contatto, si può concludere che il sacchetto di plastica è diventato positivamente carico. Analizziamo ora gli esperimenti della Sezione 5.4, insieme con gli Esperimenti dal 6.24 fino al 6.26. Essi mostrano che quando strofiniamo tra loro due corpi inizialmente neutri, uno di loro acquisisce una carica positiva e l'altro una carica negativa. Questo può essere rilevato facilmente solo quando entrambi i corpi sono isolanti. Quando uno di questi corpi è un isolante e l'altro un conduttore, normalmente la carica acquisita da quest'ultimo verrà scaricata a terra attraverso il nostro corpo. Questo può dare l'impressione che la carica sull'isolante sia sorta dal nulla, dato che il conduttore si è scaricato dopo lo sfregamento. Per osservare la carica acquisita da un conduttore durante l'attrito con un altro corpo, è essenziale isolare elettricamente il corpo conduttore. Quando esso è isolato, la carica che esso ha acquisito non sarà scaricata a terra e sarà permesso alle sue proprietà di essere osservate.

L'Esperimento 6.25 mostra anche che la carica acquisita da un isolante a causa dell'attrito non si distribuisce su tutto l'isolante. Essa, cioè, rimane attaccata alla regione strofinata. La carica acquisita da un conduttore per attrito, invece, si distribuisce rapidamente lungo la superficie conduttiva. Essa non rimane attaccata alla regione strofinata.

Negli esperimenti successivi utilizziamo due elettroscopi delle stesse dimensioni. Supponiamo anche che essi abbiano strisce della stessa lunghezza e larghezza, altrettanto sensibili (cioè con la stessa mobilità angolare rispetto alla verticale). Generalmente, considereremo anche che essi siano ugualmente carichi. Ciò può essere indicato dall'angolo delle strisce rispetto alla verticale. Dopo che sono stati caricati, non dobbiamo toccarli con il nostro corpo per evitare la loro scarica. Quando abbiamo bisogno di spostarli, è meglio reggerli dai supporti di plastica.

### Esperimento 6.27

Elettrizziamo negativamente due elettroscopi con la stessa quantità di carica, come nell'Esperimento 6.2. Poniamoli fianco a fianco nello stesso piano, separati da una pic-

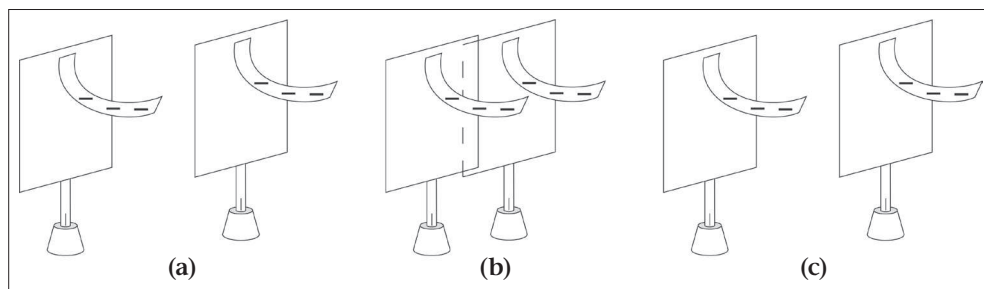



Figura 6.29. **(a)** Due elettroscopi elettrizzati con cariche dello stesso segno. **(b)** I cartoni si toccano l'un l'altro e non succede nulla. **(c)** Dopo la separazione, le strisce rimangono sollevate.

cola distanza. Dopo che le due strisce si sono sollevate e che la cannuccia strofinata che li ha caricati è stata messa via, mettiamo in contatto i due rettangoli facendoli toccare l'uno con l'altro. Osserviamo che le due strisce rimangono sollevate (figura 6.29). E rimangono sollevate anche dopo che i due elettroscopi sono stati separati. Lo stesso succede quando elettrizziamo i due elettroscopi con cariche positive uguali.

### Esperimento 6.28

Carichiamo un elettroscopio negativamente, come nell'Esperimento 6.2, e l'altro elettroscopio positivamente, come nell'Esperimento 6.8. Dopo che le strisce si sono sollevate, mettiamo via le due cannucce sfregate che hanno caricato gli elettroscopi. I due elettroscopi sono posti sullo stesso piano fianco a fianco, ad una piccola distanza l'uno dall'altro. Facciamo toccare poi i due elettroscopi.

Questa volta le due strisce cadono immediatamente, tornando al loro orientamento verticale naturale (Figura 6.30 (b))! Possiamo separare i due elettroscopi e le strisce rimangono verticali. Questo indica che i due elettroscopi, inizialmente elettrizzati con cariche opposte, sono stati scaricati dal contatto reciproco. Questo esperimento è l'opposto degli Esperimenti 6.24 e 6.26. In questi ultimi esperimenti avevamo due corpi che erano inizialmente neutri. Dopo le procedure sperimentali, essi diventavano elettrizzati con cariche di segno opposto. Nel presente esperimento, invece, abbiamo due elettroscopi elettrizzati con cariche di segno opposto. Dopo la procedura sperimentale sono diventati neutri.

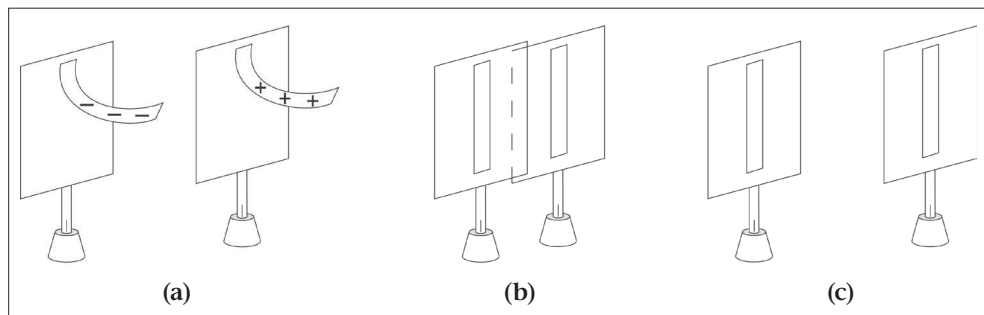



Figura 6.30. **(a)** Un elettroscopio positivo ed uno elettroscopio negativo. **(b)** Dopo il contatto, le strisce cadono. **(c)** Dopo la separazione, le strisce rimangono verticali, indicando che gli elettroscopi sono ora scarichi.

### Esperimento 6.29

Un elettroscopio è caricato negativamente, come nell'Esperimento 6.2 ed ha una buona quantità di carica. Ciò è indicato da un grande angolo di inclinazione della sua striscia rispetto alla verticale (Figura 6.31 (a)). Poniamo ora un altro elettroscopio, inizialmente scarico, di lato e nello stesso piano verticale, ad una piccola distanza dal primo. Facciamo poi toccare tra loro i due elettroscopi. Osserviamo che l'angolo della striscia del primo diminuisce, mentre la striscia del secondo elettroscopio si solleva (Figura 6.31 (b)).

Dopo la separazione, le strisce rimangono nello stesso stato. La quantità di carica di un elettroscopio può essere indicata dall'altezza della sua striscia sollevata. Questo esperimento indica che un elettroscopio carico perde parte della sua carica venendo a contatto con un secondo elettroscopio inizialmente scarico, che di conseguenza si elettrizza (Figura 6.31 (c)).

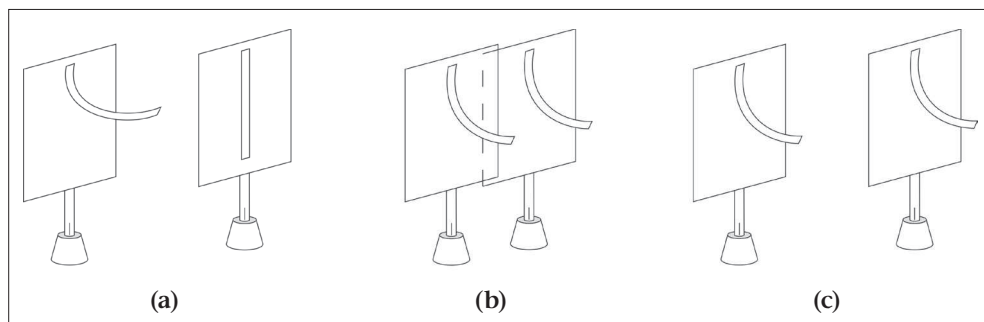



Figura 6.31. **(a)** un elettroscopio carico ed uno scarico. **(b)** Contatto tra i cartoncini. **(c)** Separazione dopo il contatto. Le strisce rimangono sollevate, ma con un'inclinazione minore dell'inclinazione in **(a)**.

Quando vengono separati, entrambi rimangono debolmente carichi. Spostando lentamente una cannuccia negativa nei pressi di entrambe le strisce, possiamo concludere che tutti e due gli elettroscopi sono ora caricati negativamente. L'inclinazione del primo elettroscopio è diminuita durante questo esperimento, mentre quella del secondo è aumentata. Questo suggerisce, tenendo conto dell'Esperimento 6.9, che parte della carica negativa originale del primo elettroscopio è stata trasferita al secondo elettroscopio.

Lo stesso effetto si verifica tra un elettroscopio carico positivamente ed un elettroscopio inizialmente scarico.

## Esperimento 6.30

Possiamo realizzare una variante degli Esperimenti 6.14 e 6.15. Gli elettroscopi *I* e *II* stiano ad una distanza di circa 15 cm l'uno dall'altro. Le strisce stiano all'esterno. Gli elettroscopi devono essere inizialmente scarichi, senza alcun collegamento tra loro. Dopo aver stabilito questa configurazione, carichiamo l'elettroscopio *I* mediante la procedura dell'Esperimento 6.2. La striscia sull'elettroscopio *I* si solleva, mentre la striscia sul elettroscopio *II* non si muove (Figura 6.32 (a)). Dopo questa procedura, la cannuccia caricata viene messa via. Prendiamo ora una seconda cannuccia neutra. Essa deve essere appoggiata sopra i cartoncini di entrambi gli elettroscopi, sostenuta da loro. Dopo che essa è stata messa lì, non cambia nulla. La striscia sull'elettroscopio *I* rimane sollevata e la striscia sull'elettroscopio *II* punta verso il basso (Figura 6.32 (b)).

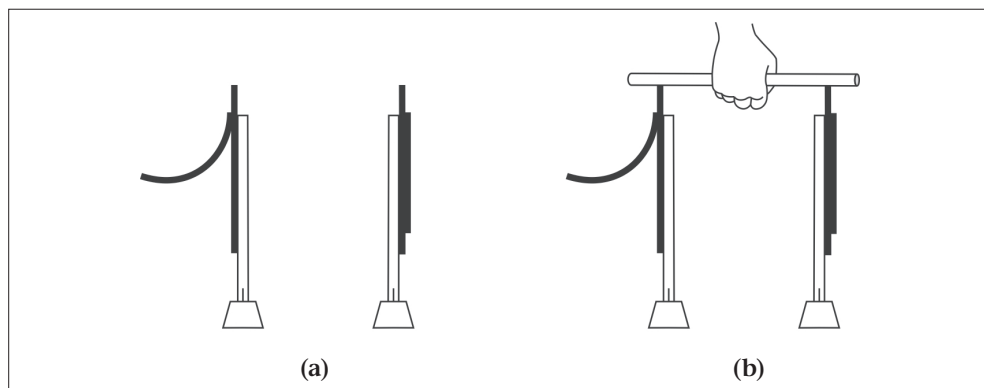



Figura 6.32. **(a)** L'elettroscopio *I* è carico. **(b)** Una cannuccia neutra viene quindi posta in modo tale da collegare i due elettroscopi. Nulla cambia quando questo è fatto.

## Esperimento 6.31

L'Esperimento 6.30 viene ripetuto. L'elettroscopio *I* è caricato, senza che al momento vi sia alcun collegamento tra gli elettroscopi (Figura 6.33 (a)).

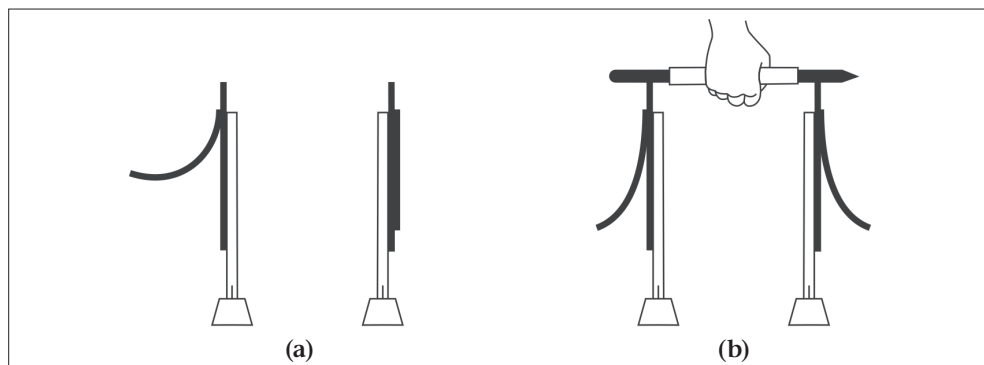



Figura 6.33. **(a)** Solo l'elettroscopio *I* viene caricato. **(b)** Un spiedino di legno è infilato in una cannuccia di plastica, con le estremità di legno sostenute dai due elettroscopi. Osserviamo che la striscia *I* si abbassa un po', mentre la striscia *II* si solleva un po'.

Ma ora i due elettroscopi non saranno collegati da una cannuccia neutra. Tagliamo invece una cannuccia di plastica in modo che la sua lunghezza sia di circa 10 cm. Uno spiedino di legno o un filo di rame, di 20 cm di lunghezza, viene fatto passare attraverso di essa. Con la nostra mano, tocchiamo solo la cannuccia e posizioniamo le estremità dello spiedino in modo che esso sia sostenuto dai cartoncini. Ora la striscia dell'elettroscopio *I* si abbassa un po', mentre la striscia dell'elettroscopio *II* si solleva un po' (Figura 6.33 (b)). Al termine della procedura entrambe le strisce saranno alla stessa altezza, ma più basse rispetto alla situazione di Figura 6.33 (a).

Due precauzioni sono essenziali per il successo di questo esperimento. La prima è di non toccare i cartoncini, lo spiedino di legno o il filo metallico con le nostre mani. La seconda è che lo spiedino o il filo devono essere racchiusi in due o tre cannucce di plastica, in quanto non tutte le cannucce sono buoni isolanti. Potrebbe capitarci infatti di far scaricare l'elettroscopio *I* parzialmente o totalmente attraverso il nostro corpo mentre mettiamo lo spiedino sui cartoncini. Le cariche elettriche presenti sull'elettroscopio *I* andranno dentro lo spiedino, passeranno attraverso la cannuccia che reggiamo in mano e quindi potrebbero scaricarsi attraverso il nostro corpo. Posizionando due o tre cannucce l'una dentro l'altra, aumentiamo l'isolamento del sistema. Se si trovano difficoltà nel cercare di mettere le cannucce una dentro l'altra, per far ciò può essere utilizzato qualsiasi altro isolante, che abbiamo già trovato (vedi la Sottosezione 6.3.2).

Nell'Esperimento 6.30 non c'era alcun trasferimento di carica elettrica tra gli elettroscopi *I* e *II* quando venivano collegati attraverso una cannuccia di plastica. Al contrario, nell'Esperimento 6.31 si osserva che quando l'elettroscopio *I* perde un po' della sua carica, l'elettroscopio *II* ne guadagna un po'.

Questi esperimenti mostrano qualitativamente la conservazione delle cariche elettriche. Quando due corpi conduttori ugualmente carichi delle stesse dimensioni e della stessa forma si toccano l'un l'altro, essi non si scaricano. Quando sono di carica opposta, invece, i due conduttori si scaricano tra di loro, rimanendo neutri dopo il contatto. Quando uno solo di essi è inizialmente carico, il contatto con il secondo conduttore avvia un trasferimento di carica dal corpo elettrizzato a quello neutro. Al termine di questo processo entrambi i conduttori diventano elettrizzati con cariche dello stesso segno.

### 6.10 Gray e la conservazione delle cariche elettriche

Forse il primo a notare sperimentalmente qualcosa di simile a questi effetti fu Gray nel 1735. Egli sospese un ragazzo mediante corde di seta, in modo che il ragazzo potesse giacere in una posizione prona. Ad un lato del ragazzo c'era un uomo, in piedi, su un supporto isolante in gommalacca[7] e resina. All'altro lato del ragazzo c'era un secondo uomo che reggeva un "filo pendulo". Questo era una sorta di elettroscopio inventato da Gray. Probabilmente era solo un filo di lino o cotone legato ad un bastoncino di legno. Essendo il filo costituito da del materiale conduttore, esso viene attratto da un corpo carico nelle vicinanze (il ragazzo in questo esempio). L'angolo di inclinazione del filo pendulo rispetto alla verticale indicherebbe la quantità di elettrizzazione del corpo lì vicino. Gray aveva menzionato precedentemente questo tipo di elettroscopio[8]. Il secondo uomo nell'esperimento di Gray era probabilmente in contatto diretto con la terra, non essendo isolato. Gray strofinò un tubo di vetro con le mani e lo portò vicino ai piedi del ragazzo. Dopo questa procedura, il ragazzo attirò il filo dell'elettroscopio che era retto dal secondo uomo. Il ragazzo poi avvicinò il suo dito all'uomo che stava sul supporto di resina. Ci fu una scarica elettrica e il ragazzo perse parte del suo potere attraente (come indicato da una diminuzione dell'angolo di inclinazione dell'elettroscopio). Allo stesso tempo, l'uomo che stava sulla resina si elettrizzò, attirando il filo dell'elettroscopio.

Citiamo i passaggi rilevanti di questo esperimento cruciale[9]:

> 6 Maggio [del 1735], abbiamo fatto il seguente esperimento. Il ragazzo era sospeso sulle corde di seta ed il tubo [di vetro strofinato] applicato vicino ai suoi piedi, come al solito, mentre egli teneva la punta del suo dito vicino alla mano di un gentiluomo, che stava in piedi su una mistura di gommalacca e colofonia nera; allo stesso tempo un altro gentiluomo stava dall'altra parte del ragazzo con il filo pendulo; poi il ragazzo fu pregato di tenere il dito vicino alla mano del primo gentiluomo, verso la quale esso era allungato, e fu sentito un rumore simile ad uno schiocco; e allo stesso tempo, il filo che per la sua attrazione si dirigeva verso il ragazzo ricadde, avendo il ragazzo perduto gran parte della sua attrazione, dopo un secondo movimento del dito verso la mano del signore, l'attrazione cessò; tenendo il filo vicino a quel gentiluomo, si vide che egli lo attraeva molto fortemente; ma avendo ripetuto in seguito questo esperimento, ho scoperto che anche se l'attrazione del ragazzo è molto diminuita, tuttavia egli non la perde completamente, fino a 2, 3, e, talvolta, 4 applicazioni del suo dito alla mano di colui che si erge sul corpo elettrico, ma senza toccarlo.

L'idea della conservazione della carica era implicitamente presente nelle concezioni di diversi scienziati che lavorarono con l'elettricità. Con Gray abbiamo il primo esperimento che dimostra questo fatto qualitativamente. Uno dei primi ad esplorare fruttuosamente il concetto di conservazione della carica fu Benjamin Franklin (1706-1790) tra il 1745 e 1747[10].

### 6.11 Breve storia dell'elettroscopio e dell'elettrometro

La procedura più antica per determinare se un corpo era carico o neutro consisteva nell'avvicinarlo a sostanze leggere, come nell'esperimento sull'effetto ambra. Più tardi, per rilevare questa proprietà dei corpi sono stati escogitati strumenti più sensibili: il perpendicolo di Fracastoro, il versorium di Gilbert, e il filo pendulo di Gray. In tutti questi casi era necessario ridurre la distanza tra il corpo strofinato e uno di questi strumenti al fine di osservare come lo strumento reagiva alla presenza del corpo, sia che esso fosse un pezzo di ambra o una cannuccia di plastica.

Solitamente non vi è differenza visibile tra un corpo neutro e uno carico. Un pezzo di ambra, per esempio, non cambia il suo colore o la sua forma quando viene caricato.

In generale possiamo solo rilevare se sia stato caricato o meno dagli effetti che provoca su sostanze vicine o su di uno strumento sensibile collocato presso di esso. Quando un pendolo elettrico è lontano da altri corpi penderà verticalmente, che esso sia carico o no. Solo quando lo portiamo in prossimità di altri materiali possiamo rilevare, dall'angolo della striscia del pendolo rispetto alla verticale, se il pendolo è carico o neutro.

In questo libro chiamiamo elettroscopio lo strumento che, una volta connesso ad un corpo, indica automaticamente se questo corpo è carico o no. Esso deve indicare questa elettricità automaticamente, in modo tale che non abbiamo bisogno di toccare l'elettroscopio o di eseguire una qualsiasi altra procedura. Anche quando questo strumento non è connesso ad un altro corpo, è possibile sapere se l'elettroscopio è carico o meno. Da questo punto di vista, l'elettroscopio è uno strumento diverso dal versorium e anche dal pendolo elettrico.

Uno strumento deve avere due proprietà principali per essere definito elettroscopio. (I) La prima è che esso stesso deve essere elettricamente isolato dal suolo. In alternativa, il corpo al quale l'elettroscopio è appoggiato deve essere isolato dal suolo. Questo isolamento elettrico è essenziale. Senza di ciò, l'elettroscopio non può conservare la carica acquisita. Per quanto riguarda gli elettroscopi utilizzati in questo libro, tale isolamento è ottenuto sorreggendo il cartoncino tramite la cannuccia di plastica neutra. (II) La seconda proprietà è che l'elettroscopio deve avere una parte visibile che cambia il suo stato a seconda che sia neutro o carico. In questo libro, essa è fornita dall'angolo tra la striscia di carta mobile e il cartoncino fisso. Negli elettroscopi classici, invece, dall'angolo tra le due foglie mobili.

Forse il primo elettroscopio con queste due proprietà fu costruito da Du Fay nel 1737[11]. Gray, prima di Du Fay, aveva già impiegato un filo di cotone o di lino legato ad un bastoncino per mostrare se un corpo vicino era carico. Ma per indicare la carica del corpo, era necessario spostare il bastoncino in prossimità del corpo ed osservare se il filo si inclinava nella sua direzione. Du Fay, invece, cominciò ad appendere sul corpo fili piegati a metà. Quando esso era carico, le due metà di ogni filo si sarebbero allontanate l'una dall'altra, formando una lettera V rovesciata. L'angolo di separazione tra le due parti sarebbe aumentata con la quantità di carica presente sul corpo. Nel primo esperimento in cui egli descrisse questa nuova procedura[12], egli sospese una barra di ferro in orizzontale mediante corde di seta. Queste corde isolavano la barra da terra. Sulla barra egli appese diversi fili della stessa lunghezza ma fatti di diversi materiali: lino, cotone, seta, e lana. Ogni filo era piegato a metà, con i loro punti centrali sorretti dalla barra. Dopo aver elettrizzato la barra, egli notò che le due metà di ogni filo si allontanavano l'una dall'altra. Inoltre, l'angolo di separazione era maggiore per il filo di lino, seguito da cotone, seta, e lana, che aveva la minima separazione angolare. Egli credeva che questo fatto indicasse che il lino avesse una maggiore capacità di accumulare materia elettrica rispetto agli altri materiali.

Egli poi presentò la seguente descrizione estremamente interessante[13]:

> Un pezzo di filo [di cotone o di lino] posto sopra una barra di ferro sospesa da corde di seta, rappresenta l'idea più semplice di esperimento, anche se può dar luogo a meditazioni profonde e serve a confermare la maggior parte dei principi che ho stabilito nelle opere precedenti, non solo sulla comunicazione dell'elettricità e i suoi effetti di attrazione e repulsione, ma anche sulla realtà dei due tipi di elettricità, cioè, quella vitrea e quella resinosa. Esso può anche essere utilizzato per sapere se la forza elettrica è maggiore o minore, cosa molto utile nella pratica di tutti gli esperimenti. Come abbiamo detto prima, per fare questo è sufficiente posizionare su una barra il pezzo di filo di lino. Si vedranno le due metà che pendono liberamente da entrambi i lati della barra, allontanarsi l'una dall'altra con una maggiore o minore forza, facendo un angolo maggiore o minore, a seconda se la barra ha ricevuto dal tubo [di vetro strofinato] una maggiore o minore virtù elettrica. [Un esempio di un esperimento di

questo tipo appare in Figura 6.34]. E questo permetterà di determinare in modo molto preciso il grado di forza dell'elettricità, in modo tale che saremo in grado di scegliere il momento e le circostanze più favorevoli per eseguire gli esperimenti che richiedono l'elettricità più forte, come nel caso degli esperimenti correlati con la luce o della comunicazione lungo una stringa o lungo un altro corpo continuo.

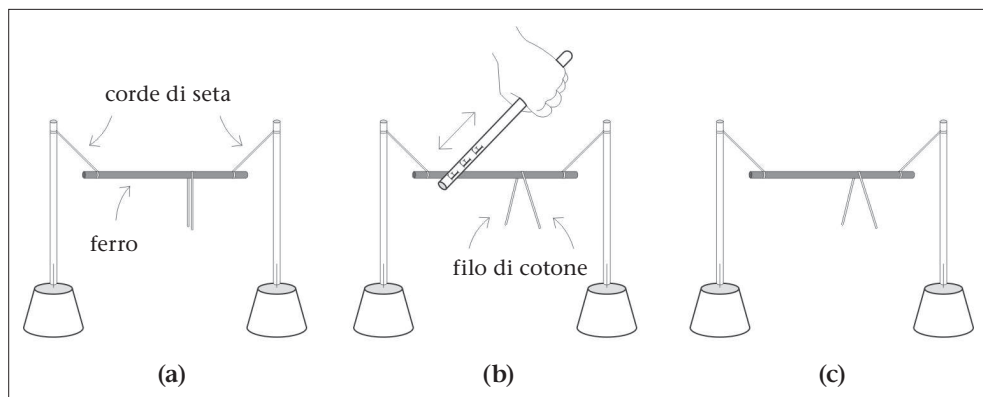



Figura 6.34. Elettroscopio di Du Fay. **(a)** Un'asta di ferro sostenuta da corde di seta. Un filo di cotone è tenuto sospeso dalla barra. **(b)** Un tubo di vetro strofinato è strisciato contro la barra. **(c)** Quando allontaniamo il vetro, le due metà del filo di cotone si allontanano l'una dall'altra.

L'esperimento di Du Fay è analogo al nostro Esperimento 6.9, rappresentato dalla Figura 6.12. Aumentando la quantità di carica sull'elettroscopio, aumentiamo l'angolo di separazione delle foglie.

Du Fay utilizzò il suo elettroscopio per scoprire quali corpi sono i migliori isolanti. Per fare questo, egli sospese una barra di ferro mediante stringhe fatte di diverse sostanze o sostenne la barra su corpi solidi costituiti da materiali diversi. Dopo questa preparazione, egli caricò la barra di ferro con un tubo di vetro che era stato precedentemente strofinato. Poi notò, osservando l'angolo del suo elettroscopio collegato alla barra, quale materiale permetteva ad essa di rimanere carica per un tempo più lungo. Questo materiale (le corde con cui la barra era sospesa o il supporto rigido sotto la barra che la sosteneva dal suolo) sarebbe stato l'isolante migliore[14].

Figura 6.35. Jean Antoine Nollet (1700-1770).

Jean Antoine Nollet (1700-1770) (Figura 6.35), fu assistente di Du Fay per alcuni anni, dal 1731 o 1732 al 1735 circa[15].

Nel 1747 Nollet presentò un miglioramento dell'elettroscopio di Du Fay. I fili aperti, come la lettera V rovesciata, erano connessi direttamente al corpo carico. Una lampada illuminava i fili e proiettava le loro ombre su uno schermo graduato dove si poteva leggere direttamente l'angolo formato dai fili. Ciò consentiva grande precisione nella determinazione di questi angoli, poiché lo schermo e l'osservatore potevano essere distanti dall'elettroscopio in modo da non influenzare la lettura (Figura 6.36)[16].

Figura 6.36. Elettrometro di Nollet.

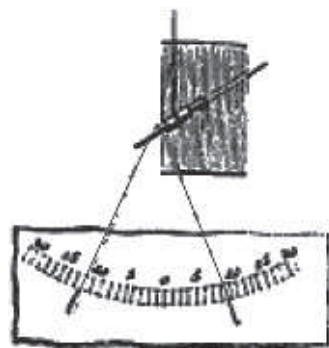



Figura 6.37. Un altro elettrometro fatto da Nollet.

Nollet creò un nome per questo strumento: l'*elettrometro*[17]:

> In diverse occasioni ho utilizzato un mezzo molto semplice, per conoscere i progressi dell'elettricità, che meriterebbe il nome di *elettrometro*, se esso fosse generalmente impiegato e se esso potesse servire a misurare attraverso quantità ben note, di cui non potessimo dubitare, gli aumenti o i decrementi che esso indica.

Questo è un nome appropriato, poiché tale strumento consente la misura quantitativa di un angolo. E il valore di tale angolo è correlato all'elettricità del corpo a cui è collegato. L'elettrometro è un elettroscopio con il quale possiamo fare una misurazione quantitativa precisa di una proprietà – come l'angolo in questo caso – associata all'elettricità.

Un altro esempio di uno dei suoi elettrometri è dato in Figura 6.37[18].

Per evitare perdite di elettricità dalle estremità dei fili di qualsiasi elettroscopio, in seguito, si usò mettere su di esse piccole sfere leggere di midollo di sambuco o di sughero. Uno degli scienziati responsabili di questo ulteriore passo è stato John Canton nel 1752-4[19]. La figura 6.38 presenta l'elettroscopio di Canton.

Più tardi i fili di lino furono sostituiti da cannucce rigide e foglie di metallo. Esse erano più resistenti e consentivano una determinazione più precisa dell'angolo di apertura. Abraham Bennet (1750-1799) e Alessandro Volta (1745-1827) furono scienziati importanti che contribuirono a questi sviluppi. L'elettrometro di Bennet con le sue due strisce di foglia d'oro è rappresentato nella Figura 6.39[20].

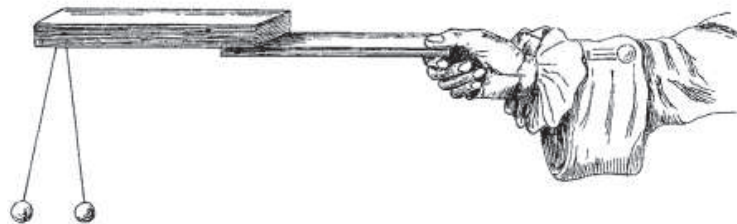



Figura 6.38. Elettroscopio di Canton.

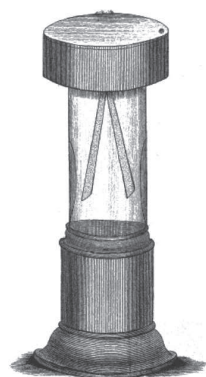



Figura 6.39. Elettrometro di Bennet.

Georg Wilhelm Richmann (1711-1753) creò un elettrometro tra il 1744 e il 1753 in cui una delle cannucce era fissa rispetto al suolo e solo una singola cannuccia o striscia si allontanava dalla verticale quando l'elettroscopio era carico (Figura 6.40)[21]. Questo è analogo all'elettroscopio di Figura 6.1 che viene utilizzato nella maggior parte degli esperimenti in questo libro.

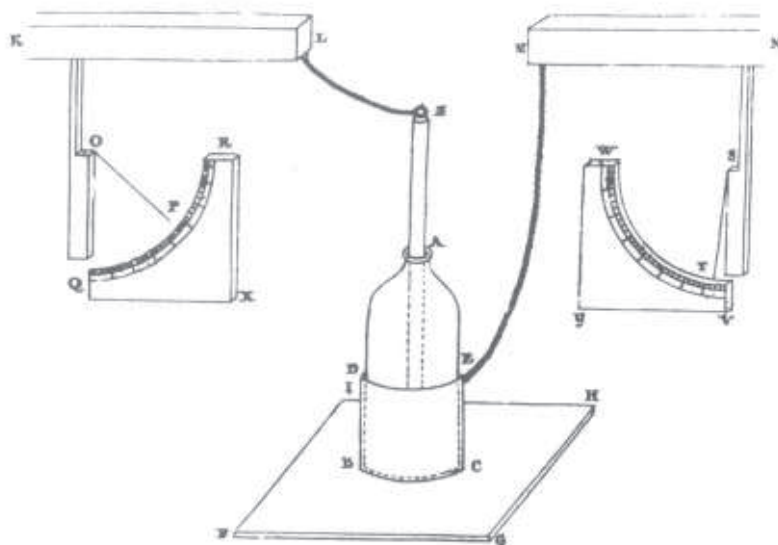



Figura 6.40. Elettrometri di Richmann connessi ad una bottiglia di Leida. Ognuno degli elettrometri ha una singola striscia mobile.

Questo tipo di elettrometro fu sviluppato in seguito da William Henley (data di nascita sconosciuta, morto nel 1779) nel 1772 (Figura 6.41)[22]. Esso ha una sola asta leggera mobile *A*, con una palla di sughero all'estremità, fatta per girare intorno al centro *B*. Quando l'elettrometro è carico, c'è una repulsione tra l'asta mobile *A* e l'asse *C* fisso. L'angolo di apertura può essere letto sul goniometro collegato allo strumento.

Per maggiori dettagli sulla storia dell'elettroscopio e dell'elettrometro, vedere le opere di Walker, Heilbron, e Medeiros[23].

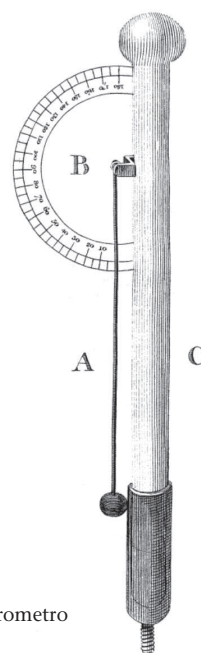



Figura 6.41. Elettrometro di Henley.

## Note

1 [Grah].
2 [Desa] (riferito a [Desc]), [Pri66, p. 82] e [Hei99, pp. 292-293, nota 12].
3 [Desa, p. 193].
4 [DF33d, p. 249]: Cette expérience prouve combien il est nécessaire que la corde dont on se sert pour transmettre au loin l'électricité, soit isolée, ou ne soit soûtenüe que de corps le moins propres qu'il est possible à se charger eux-mêmes de l'électricité.
5 [DF37b, p. 94]. M'étant donc assüré de cette égalité pour les expériences que j'avois dessein de tenter, je me suis servi d'une barre de fer d'un pouce en quarré & de quatre pieds de long, elle étoit, comme je l'ai dit, suspendüe sur des cordons de soye & isolée, afin que rien ne pût d'etourner le tourbillon électrique qui lui seroit communiqué par le tube.
6 [Hem80] e [Hei99, p. 252, nota 10].
7 Vedi appendice B
8 [Grad, p. 228], [Graf, p. 289] e [Grai, pp. 167-168]. Vedi anche la Sezione 4.9.
9 [Grai, p. 168].
10 [Hei99, pp. 327-333].
11 [DF37b pp. 94-98].
12 [DF37b, pp. 95-96].
13 [DF37b, p. 98]. Une aiguillée de fil posée sur une barre de fer suspenduë par des cordons de soye, présente l'idée de la plus simple de toutes les expériences, cependant elle peut fournir de sujet à des méditations profondes, & elle sert à confirmer la plûpart des principes que j'ai établis dans mes Mémoires précédents, tant sur la communication de l'électricité & ses effets de répulsion & d'attraction, que sur la réalité des deux genres d'électricité, sçavoir la vitrée & la résineuse. Elle sert aussi à connoitre si la force de l'électricité est plus ou moins grande, ce qui est très-commode dans la pratique de toutes ces expériences; il ne s'agit pour cela que de poser sur la barre le bout de fil, comme nous l'avons dit, on verra pour lors les deux bouts qui pendent librement d'un côté & de l'autre de la barre s'écarter l'un de l'autre avec plus ou moins de force, & former un angle plus ou moins grand, suivant que la barre aura reçû du tube plus ou moins de vertu électrique, & cela fera connoître d'une maniére assés exacte, le degré de force de l'électricité, de sorte que l'on pourra choisir le temps & les circonstances les plus favorables pour les expériences qui demandent la plus forte électricité, telles que sont celles qui concernent la lumiére, ou la communication le long d'une corde ou d'un autre corps continu.
14 [DF37b, p. 99].
15 [Hei81e] e [Hei99, pp. 279-289].
16 [Nol47, p. 129] e [Hei99, pp. 353].
17 [Nol47, p. 129]: Dans bien des occasions je me suis servi, pour connoître les progrès de l'électricité, d'un moyen assez simple & qui mériteroit le titre d'*électromètre*, s'il étoit généralement applicable, & s'il pouvoit servir à mesurer par des quantités bien connues, & dont on ne pût douter, les augmentations ou diminutions qu'il indique.
18 [Nol67, Tavola 4, Figura 15].
19 [Can53], [Can54] e [Wal36].
20 [Ben86] e [Hei99, p. 450].
21 [Hei99, p. 392].
22 [Pri72].
23 [Wal36], [Hei99, pp. xvi, xx, 82, 259, 327, 331, 353, 367, 373-376, 390-392, 418, 421-422, 447-456, 462, e 491-494], e [Med02].

# Capitolo 7

# Differenze tra conduttori e isolanti

### 7.1 Mobilità delle cariche in conduttori ed isolanti

Abbiamo visto che la proprietà principale di un isolante come la plastica è che non può essere attraversato da un flusso di cariche elettriche. Pertanto, esso non scarica un elettroscopio elettrizzato. Un conduttore, invece, permette tale passaggio di cariche. Esempi di conduttori sono il corpo umano, il suolo, un metallo, un foglio di carta o il cartoncino sottile di un elettroscopio. Pertanto, quando un elettroscopio elettrizzato è collegato a terra tramite un conduttore, esso viene scaricato. Vediamo ora altre proprietà che distinguono i conduttori dagli isolanti.

**Esperimento 7.1**

Tagliamo una striscia rettangolare di cartoncino, lunga 30 cm e larga 2 cm. Tale striscia sia posta in verticale, ma con il lato più lungo parallelo all'orizzonte. Attacchiamo l'estremità superiore di una cannuccia di plastica verticale al centro della striscia, formando una lettera T. L'estremità inferiore della cannuccia deve essere fissata ad un supporto adeguato, come della plastilina o il supporto del pendolo elettrico visto nella Sezione 4.4. Distribuiamo poi lungo la striscia di cartoncino, appendendole ad esso, quattro strisce molto sottili di carta velina lunghe 10 cm. Esse devono essere piegate a metà, in modo tale che le due metà siano appese una accanto all'altra verticalmente. Dopo questa procedura, strofiniamo un'altra cannuccia di plastica. Essa deve essere strisciata una o più volte sul cartoncino orizzontale, facendolo caricare. Mettiamo via la cannuccia strofinata. Tutte le strisce di carta velina si aprono verso l'esterno, con ogni metà che si allontana dall'altra metà.

Lo stesso esperimento può essere ripetuto con una striscia di cartoncino più grande, per esempio lunga 60 cm. Per fare questo, possiamo usare due cannucce di plastica verticali, poste a intervalli regolari, una alla distanza di 20 cm da un'estremità del cartoncino e l'altra ad una distanza di 20 cm dall'altra estremità. Stendiamo diverse strisce molto sottili di carta velina sopra il bordo orizzontale superiore dell'ampia striscia di cartoncino, le quali si comporteranno come una serie di elettroscopi. Quando carichiamo il cartoncino strisciandolo con una cannuccia strofinata, tutte le sottili strisce di carta velina aprono le gambe. Invece di una striscia rettangolare di cartoncino possiamo anche utilizzare un cavo duro di rame.

Ora costruiamo una T delle stesse dimensioni, ma fatta solo di plastica. La porzione superiore orizzontale della T può essere un righello di plastica (con il suo piano messo in verticale) o una serie di cannucce di plastica adiacenti, attaccando l'una all'altra le loro estremità. Appendiamo le sottili strisce di carta velina sopra la sezione superiore della T, distribuendole su tutta la sua lunghezza. Strofiniamo un'altra cannuccia di plastica e strisciamola sopra il bordo superiore della T di plastica. In questo caso le fettucce sottili di carta velina non aprono le gambe, ad eccezione di quelle vicino alla regione strisciata.

**Esperimento 7.2**

Tagliamo un disco di cartoncino con un diametro di 20 cm. Il piano del disco rimarrà orizzontale, sostenuto da cannucce di plastica collocate verticalmente in appropriate posizioni sotto di esso. Con delle forbici o con delle perforatrici facciamo molte coppie

di fori lungo un diametro del disco, con i fori di ciascuna coppia molto vicini l'uno all'altro. Passiamo poi una singola sottile fettuccia di carta velina attraverso ciascuna coppia di fori in modo che essa risulti appesa nel mezzo, ogni metà passante attraverso uno dei fori e avente di fronte l'altra metà. Un'altra possibilità è quella di attaccare strisce aventi la forma della lettera L, incollandola sul lato inferiore del disco. Due strisce affiancate costruiranno una lettera T, con la porzione verticale della lettera composta dalle due bande pendenti dal disco verticalmente l'una accanto all'altra. Strofiniamo un'altra cannuccia di plastica e strisciamola lungo il bordo del disco. Le fettucce di carta velina divaricano le gambe. Questo avviene anche per quelle che sono situate lontano dalla regione del disco che è stata strisciata.

Lo stesso effetto non avviene su un disco di plastica. In questo caso le fettucce di carta velina che sono lontane dalla regione strisciata non divergono le gambe, dopo che il disco di plastica è stato strisciato con una cannuccia strofinata. Solo quelle che sono vicine alla zona strisciata si separeranno le une dalle altre.

Questi esperimenti dimostrano che quando si carica un conduttore, le cariche tendono a diffondersi attraverso tutta la sua superficie. In un isolante, invece, esse non si muovono liberamente lungo la sua superficie, rimanendo attaccate al luogo dove sono state generate o sono state trasferite all'isolante. Lo stesso effetto era stato visto nell'Esperimento 6.25.

## 7.2 Collettori di carica

Il nostro prossimo strumento elettrico è un collettore di carica. Viene utilizzato per ottenere una piccola quantità di carica da ogni regione di un corpo elettrizzato. Spostando questa carica accumulata verso pendoli caricati positivamente e negativamente in precedenza o verso elettroscopi precedentemente caricati, è possibile determinarne il segno. L'entità delle attrazioni e delle repulsioni generate sui pendoli e sugli elettroscopi indica anche se la carica accumulata è grande o piccola. Sebbene un pendolo elettrico o un elettroscopio possano anche essere impiegati come collettori di carica, useremo questo termine per designare strumenti costruiti specificamente per questo scopo. Un altro possibile impiego di un collettore di carica è di servire come trasportatore di carica tra due conduttori separati spazialmente.

Il collettore più semplice è una sfera fatta di alluminio, quello in fogli per alimenti già usato in precedenza, il quale viene appallottolato e poi sospeso ad un capo di un filo di seta o di nylon, mentre l'altro capo del filo è legato ad una cannuccia di plastica (Figura 7.1). La sfera può anche essere fatta di carta o di altro conduttore appropriato. Poiché la seta è un isolante, essa impedisce all'elettricità accumulata di scaricarsi. Aumentando il diametro della sfera, aumentiamo la quantità di carica che si raccoglie ad ogni esperimento.

Un secondo modello analogo al precedente è costituito da un'uguale sfera di alluminio posta all'estremità di una cannuccia di plastica (Figura 7.2). La differenza principale rispetto al modello precedente è la rigidità della cannuccia. Per questo motivo, esso può essere utilizzato per raccogliere cariche sulle parti superiori o laterali di conduttori caricati, tenendo la cannuccia dal basso o di lato. Ciò permette un miglior controllo sulla posizione della sfera di alluminio.

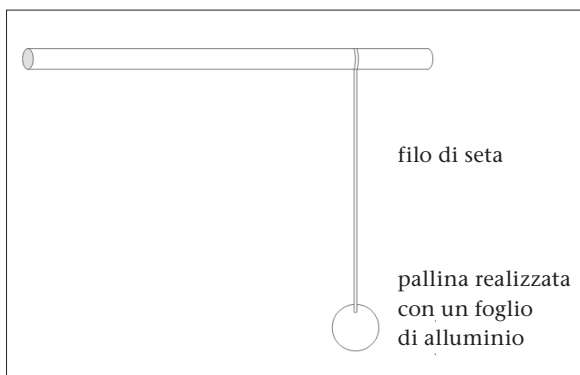



Figura 7.1. Un collettore di carica.

Figura 7.2. Un altro collettore di carica.

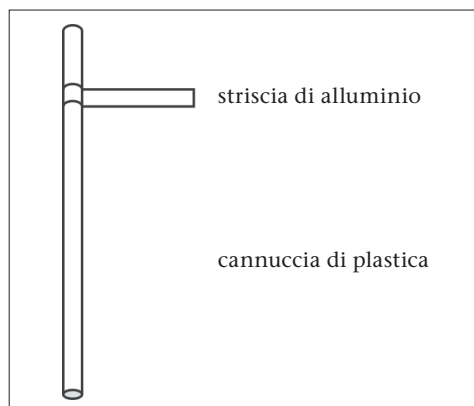



Figura 7.3. Un terzo modello di collettore di carica.

Un altro modello ancora è composto da una striscia di alluminio fissata all'estremità di una cannuccia di plastica. Questa striscia, per esempio, può essere lunga 5 cm e larga 2 mm e va incollata intorno alla punta della cannuccia (Figura 7.3).

Forse il più vecchio collettore di carica costruito esclusivamente per questo scopo fu realizzato da F. U. T. Epino (1724-1802). Non si conosce alcun suo ritratto[1].

Il suo collettore di carica era semplicemente un piccolo pezzo di metallo lungo circa 3,8 cm e provvisto di un piccolo gancio al centro, a cui egli attaccava un filo di seta ben secco. Egli descrisse questo strumento e diversi esperimenti interessanti con esso realizzati in un libro pubblicato in latino nel 1759, *Saggio sulla Teoria dell'Elettricità e del Magnetismo*[2].

Un altro modello fu inventato nel 1787 da Charles Augustin Coulomb (1736-1806) e fu chiamato piano di prova (Figura 7.4)[3]. Coulomb conosceva il lavoro di Epino e lo cita nei suoi lavori. Il piano di prova è un disco di materiale conduttore attaccato ad un manico isolante, fissato al centro del disco. Coulomb lo utilizzò per determinare la distribuzione di carica sulle superfici di due o tre conduttori caricati per contatto. La quantità di carica accumulata dal piano di prova è proporzionale alla densità superficiale locale della carica. Il modello che usiamo qui è un disco di cartoncino di 3 cm di diametro. Possiamo mettere un foglio di alluminio su una delle sue facce, ma questo non è essenziale. Tagliamo un pezzo di cannuccia di plastica di 5 cm di lunghezza. Essa sarà attaccata perpendicolarmente al centro del disco, come se fosse il suo asse di simmetria. Una delle estremità della cannuccia può essere attaccata al centro del disco con della plastilina (Figura 7.5). Quando manipoliamo tale piano di prova, dobbiamo toccare solo la cannuccia, ma non la plastilina o il disco.

Figura 7.4. Charles-Augustin Coulomb (1736-1806).

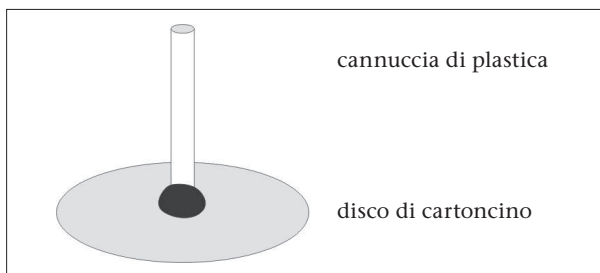



Figura 7.5. Piano di prova di Coulomb. Questo è anche un collettore, ma sarà denominato piano di prova per chiarezza quando descriveremo gli esperimenti che seguono.

I collettori di carica di cui si è detto saranno utilizzati in alcuni esperimenti qui descritti.

## 7.3 La polarizzazione elettrica di conduttori

### Esperimento 7.3

Abbiamo visto nell'Esperimento 6.12 che il cartoncino è conduttore, mentre la plastica è isolante. Usiamo questo fatto per costruire un conduttore isolato: un disco orizzontale di cartoncino con un diametro di 15 cm è sostenuto da quattro cannucce di plastica verticali attaccate ad opportuni supporti, come ad esempio quelli dei pendoli elettrici. Mettiamo tre piani di prova di Coulomb sulla parte superiore del disco, allineati lungo un diametro del disco, uno al centro e gli altri due vicino ai bordi opposti. Chiamiamoli 1, 2, e 3, con il secondo al centro del disco. Inizialmente tocchiamo il disco con il nostro dito per scaricarlo. Cominciamo ora l'esperimento per studiare la distribuzione delle cariche su di esso in presenza di altri corpi carichi nelle vicinanze. Per fare questo, carichiamo prima due elettroscopi, uno positivamente e l'altro negativamente. Collochiamoli lontani tra loro e dal disco orizzontale. Utilizzeremo anche un terzo elettroscopio inizialmente scarico.

Carichiamo una cannuccia negativamente per tutta la sua lunghezza strofinandola tra i nostri capelli. In seguito essa deve essere messa in verticale su un supporto appropriato. Il punto medio di questa cannuccia deve trovarsi alla stessa altezza del piano orizzontale del disco. La cannuccia strofinata è portata in prossimità del disco, senza toccarlo, vicino al piano di prova 1 (Figura 7.6). Essi saranno quindi nella seguente sequenza: cannuccia negativa, piani di prova 1, 2, e 3, rispettivamente. La cannuccia deve essere a circa 2 cm dal bordo del disco più vicino. Togliamo il piano di prova 2 e portiamolo in prossimità dell'elettroscopio scarico. Non succede nulla, e ciò indica che esso è elettricamente neutro. Possiamo rimetterlo al suo posto originale. Ora togliamo il piano di prova 1 e lentamente portiamolo vicino all'elettroscopio scarico, senza farli toccare. La striscia di questo elettroscopio è attratta da detto piano di prova, indicando che esso è carico. Portiamolo poi lentamente vicino agli elettroscopi negativo e positivo, impedendo come sempre che essi vengano a contatto. Il piano di prova carico attira la striscia sull'elettroscopio negativo e respinge la striscia sull'elettroscopio positivo. Da questi fatti possiamo concludere che il piano di prova 1 è diventato carico positivamente a causa della presenza della cannuccia negativa nelle vicinanze. Rimettiamolo nella sua posizione originale sopra il disco orizzontale. Rimuoviamo ora il piano di prova 3 e ripetiamo queste procedure, concludendo che esso è diventato negativamente carico.

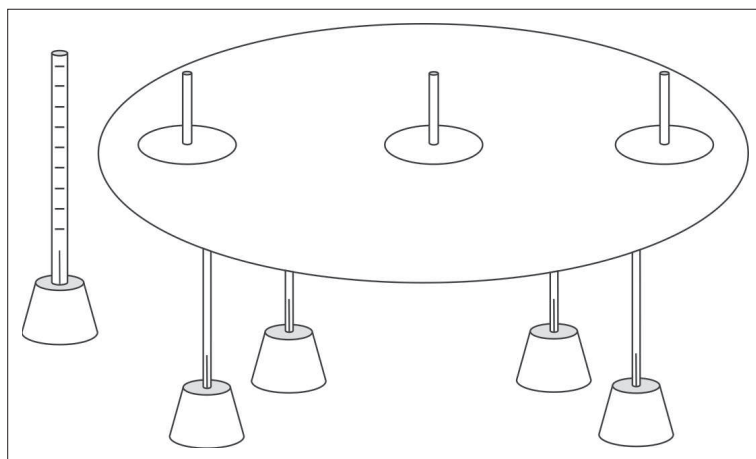



Figura 7.6. Esperimento per mostrare la distribuzione delle cariche su un conduttore alla presenza di corpi vicini elettrizzati.

### Esperimento 7.4

Ripetiamo l'Esperimento 7.3, ma ora poniamo la cannuccia carica negativamente a circa 5 cm dal bordo più vicino. Ancora una volta questa cannuccia negativa è allineata con i piani di prova di Coulomb nel seguente ordine: cannuccia negativa, piani di prova 1, 2, e 3, rispettivamente. Quando eseguiamo la precedente procedura, non troviamo carica sul piano di prova 2. Il piano di prova di Coulomb 1 risulta essere di nuovo positivamente carico, ma con una minore quantità di carica rispetto al piano di prova 1 dell'Esperimento 7.3. Dopo aver rimesso questo primo piano di prova nella sua posizione originale sopra al disco, rimuoviamo il piano di prova 3 e testiamo la sua carica. Ancora una volta esso si trova ad essere caricato negativamente, ma anche in questo caso con una quantità di carica minore rispetto al piano di prova 3 dell'Esperimento 7.3. Questo è indicato dalle minori forze repulsive ed attrattive che esso esercita sugli elettroscopi negativi e positivi, rispettivamente.

Possiamo ripetere l'Esperimento 7.3, mettendo ogni volta la cannuccia negativa più lontana dal disco. Più lontana questa è, minore è la quantità di cariche opposte accumulate dai piani di prova 1 e 3. Quando la cannuccia negativa è a 20 cm di distanza dal bordo più vicino del disco, o anche più lontano, nessuna carica rilevabile viene accumulata dai piani di prova di questi esperimenti.

### Esperimento 7.5

Ripetiamo l'Esperimento 7.3. Osserviamo innanzitutto le forze esercitate dai piani di prova carichi sui tre elettroscopi a nostra disposizione, il positivo, il negativo ed ora anche il neutro, quando la cannuccia negativa è a circa 2 cm dal bordo del disco.

Mettiamo poi insieme 2 o 3 cannucce cariche negativamente, una accanto all'altra, con ciascuna cannuccia sul proprio supporto. Le loro estremità possono anche essere legate insieme e le si può mettere anche tutte fianco a fianco su un unico supporto. Questo insieme di 2 o 3 cannucce deve essere messo nuovamente a circa 2 cm dal bordo del disco. Le cannucce devono avere all'incirca la stessa quantità di carica, come quella che si ottiene strofinandole tra i capelli per uno stesso intervallo di tempo. Ripetiamo l'Esperimento 7.3 e osserviamo che il piano di prova 1 è diventato di nuovo positivamente carico, come prima. Ma ora esercita una forza di attrazione molto più grande sulla striscia dell'elettroscopio neutro rispetto alla forza di attrazione esercitata dal piano di prova 1 dell'Esperimento 7.3. Esso esercita anche una più intensa forza attrattiva sulla striscia dell'elettroscopio negativo, e una più rilevante forza repulsiva sulla striscia dell'elettroscopio positivo. Per questa ragione, possiamo concludere che questo piano di prova ha una maggiore quantità di carica rispetto a quella accumulata dal piano di prova 1 nell'Esperimento 7.3. Le intensità delle forze esercitate dal piano di prova 3 sulle strisce degli elettroscopi in questo esperimento sono anch'esse più grandi delle forze analoghe esercitate dal piano di prova 3 nell'Esperimento 7.3. Di conseguenza, possiamo concludere che esso ha acquisito una maggiore quantità di carica negativa rispetto al piano di prova 3 nell'Esperimento 7.3.

### Esperimento 7.6

Tagliamo un cartoncino rettangolare sottile con lati di 10 e 7 cm. Esso sarà messo in verticale, con il lato più lungo in orizzontale e quello più corto in verticale. Attacchiamo con del nastro adesivo, in verticale, una cannuccia al centro del rettangolo. L'estremità inferiore della cannuccia sia fissata su un supporto adeguato. Tocchiamo poi il rettangolo per scaricarlo. Come nell'Esperimento 7.3, prepariamo in anticipo un elettroscopio positivamente carico e un altro negativamente carico. In questo esperimento useremo la striscia di foglio di alluminio attaccata ad una cannuccia di plastica

come collettore di carica, come nella Sezione 7.2 (Figura 7.3). Carichiamo negativamente un'altra cannuccia e poniamola in verticale su un supporto adeguato. I due elettroscopi carichi, il rettangolo e la cannuccia carica, sono inizialmente ben separati l'uno dall'altro.

Avviciniamo ora la cannuccia carica ad uno dei bordi verticali del rettangolo, senza che venga in contatto con esso. Quando sono molto vicini l'una all'altro, ad una distanza di 1 o 2 cm, strisciamo il pezzetto di alluminio del collettore su e giù sull'altro bordo verticale del rettangolo (Figura 7.7). Portiamolo poi vicino ai due elettroscopi carichi, senza lasciarli toccare. Dalle attrazioni e repulsioni osservate in questi elettroscopi, possiamo concludere che la striscia del collettore è diventata negativamente carica.

Figura 7.7. Studio della distribuzione delle cariche in un conduttore.

Scarichiamo questa striscia toccandola con il dito. Ora strisciamola su e giù sul bordo verticale del rettangolo che è più vicino alla cannuccia carica, facendo attenzione a non far toccare la cannuccia con essa. Quando poi l'avviciniamo lentamente ai due elettroscopi carichi, possiamo concludere che la striscia è diventata positivamente carica.

## Esperimento 7.7

Ripetiamo l'Esperimento 7.6, ma ora posizioniamo la cannuccia negativa a circa 5 cm dal bordo più vicino del rettangolo. Quando ripetiamo questa procedura, troviamo nuovamente che il lato del rettangolo più distante dalla cannuccia negativa è diventato negativamente carico mentre il lato del rettangolo che è più vicino alla cannuccia negativa è diventato positivamente carico. Ma le quantità di queste cariche raccolte sono più piccole rispetto alle cariche analoghe raccolte nell'Esperimento 7.6. Queste quantità di carica possono essere stimate dalle forze che la striscia carica esercita sugli elettroscopi positivi e negativi.

Nessuna quantità apprezzabile di carica viene raccolta dalla striscia di metallo, quando la cannuccia negativa è a 20 cm dal bordo più vicino del rettangolo, o anche più lontana da esso.

## Esperimento 7.8

Ripetiamo l'Esperimento 7.6, ma ora mettiamo insieme 2 o 3 cannucce cariche negativamente come nell'Esperimento 7.5. Esse dovrebbero avere all'incirca la stessa elettrizzazione, se sono state strofinate ugualmente tra i capelli. Esse devono esser poste a circa 1 o 2 cm da un lato del rettangolo. Dopo aver ripetuto la stessa procedura di prima, troviamo che la striscia di alluminio del collettore ha acquisito una maggiore quantità di cariche positive e negative rispetto alle cariche raccolte nell'Esperimento 7.6.

Questi esperimenti mostrano che la presenza della cannuccia strofinata provoca una separazione di cariche sul conduttore vicino. La porzione del conduttore che è più vicina alla cannuccia strofinata acquisisce una carica di segno opposto rispetto a quella della cannuccia, mentre la parte opposta del conduttore acquisisce una carica dello stesso segno della carica della cannuccia.

**Definizioni:** Questo fenomeno e questo processo sono chiamati *polarizzazione elettrica o elettrostatica, induzione, influenza, polarizzazione per induzione, polarizzazione per influenza, elettrizzazione per influenza, elettrizzazione per induzione*, o *elettrizzazione per comunicazione*. In questo lavoro utilizziamo preferenzialmente la prima espressione, *polarizzazione elettrica*.

Gli Esperimenti 7.4 e 7.7 ci mostrano qualcosa in più. Possiamo aumentare la quantità di cariche indotte su entrambi i lati del conduttore diminuendo la distanza tra il conduttore e la cannuccia strofinata. Questo è rappresentato nella Figura 7.8.

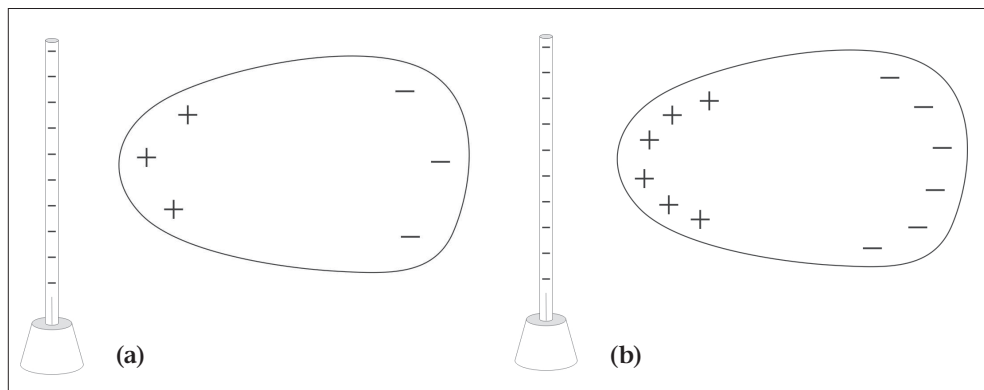



Figura 7.8. **(a)** La polarizzazione di un conduttore causata da un isolante elettrizzato vicino. **(b)** Quando diminuiamo la distanza tra questi corpi, la quantità di cariche positive e negative indotte sul conduttore aumenta.

Consideriamo di nuovo l'Esperimento 4.5. L'inclinazione del pendolo rispetto alla verticale aumenta quando diminuisce la distanza tra la cannuccia strofinata e il pendolo. Questo indica la presenza di una maggiore forza tra di loro.

Da quanto appena constatato, possiamo aumentare la polarizzazione del disco accorciando la sua distanza dalla cannuccia elettrizzata (Figura 7.9).

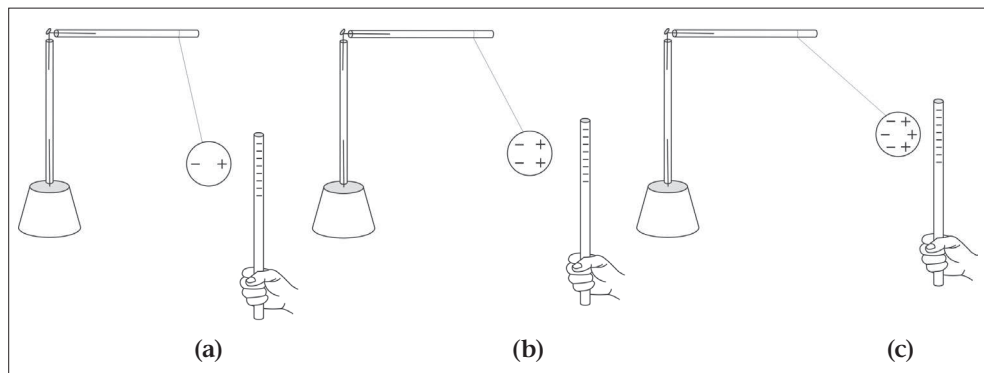



Figura 7.9. Diminuendo la distanza tra una cannuccia strofinata e un pendolo, aumentiamo la polarizzazione delle cariche indotte sul disco conduttore.

Gli esperimenti 7.5 e 7.8 mostrano anche qualcosa di rilevante. Possiamo anche aumentare la quantità di cariche indotte su entrambi i lati del conduttore aumentando la quantità di carica sull'isolante vicino elettrizzato (Figura 7.10).

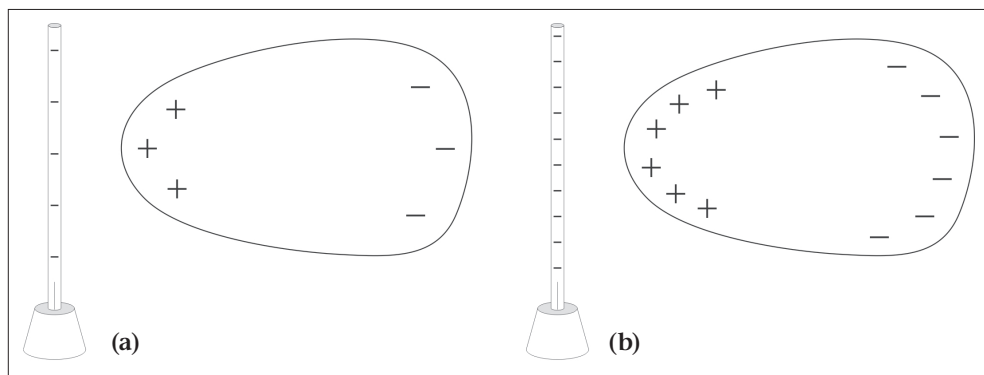



Figura 7.10. (**a**) La polarizzazione di un conduttore dovuta ad un isolante elettrizzato vicino. (**b**) Quando aumentiamo l'elettrizzazione dell'isolante, la quantità di cariche positive e negative indotte sul conduttore aumenta.

### 7.3.1 Epino e polarizzazione elettrica

Uno degli scienziati più importanti che si sono occupati di questo argomento è stato Epino nel periodo 1755-1759[4]. Un esperimento analogo all'Esperimento 7.3 fu eseguito per la prima volta proprio da lui, che lo descrisse nel suo libro del 1759[5]. La Figura 7.11 mostra una rappresentazione di uno dei suoi esperimenti.

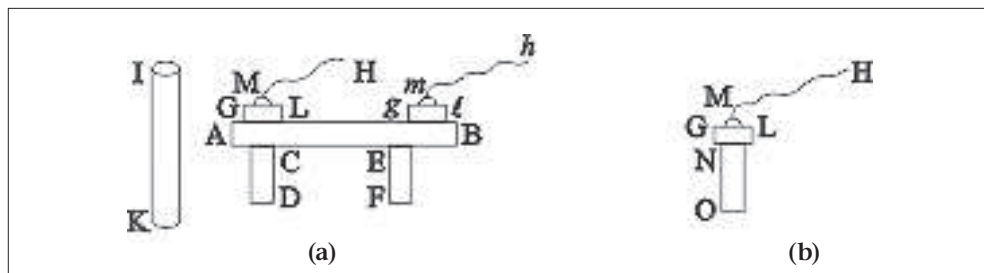



Figura 7.11. Esperimento di Epino per dimostrare la polarizzazione dei conduttori nei pressi di corpi elettrizzati.

Invece di un disco di cartone supportato da cannucce di plastica, egli si serviva di una barra metallica *AB* lunga circa 30 cm su supporti di vetro isolanti *CD* e *EF* (Figura 7.11 (a)). I suoi collettori di carica sono stati descritti nella Sezione 7.2. Erano pezzi in metallo *GL* e *gℓ* lunghi 3,8 cm circa e aventi piccoli uncini *M* e *m* al loro centro, a cui erano stati attaccati fili di seta ben essiccati *HM* e *hm*. Come corpo carico, invece della nostra cannuccia strofinata negativa, egli usò il cilindro "elettrizzatorio" *IK*. Esso poteva essere un cilindro di vetro elettrizzato positivamente per strofinio o un cilindro di zolfo elettrizzato negativamente allo stesso modo.

Egli testò le cariche indotte alle estremità della barra metallica dalla presenza di ciascun cilindro. Egli quindi dimostrò la polarizzazione del conduttore. Per fare questo, egli prese il cilindro elettrizzato per strofinio, lo portò vicino all'estremità *A* dell'asta, ad una distanza di circa 2,5 cm e lo tenne lì immobile. Successivamente sollevò il pezzo di metallo *GL* mediante il filo di seta *HM* e lo collocò sul supporto di vetro *NO* (Figura 7.11 (b)). Quando portò corpi positivi e negativi vicino al suo collettore di carica posto su *NO*, egli concluse che esso aveva acquisito una carica di segno opposto rispetto al cilindro "elettrizzatorio". Quando eseguì la stessa prova con l'altro collettore di carica *gℓ*, egli

concluse che esso aveva acquisito una carica risultante avente lo stesso segno di detto cilindro. Le estremità *A* e *B* del conduttore acquisirono cioè cariche di segno opposto, con la carica in *B* dello stesso segno rispetto al cilindro *IK*.

## 7.4 Attrazioni e repulsioni esercitate da un corpo polarizzato

### Esperimento 7.9

In questo esperimento utilizziamo il rettangolo di cartoncino dell'Esperimento 7.6, un pendolo elettrico ed una cannuccia di plastica. Scarichiamo il rettangolo e il pendolo toccandoli col nostro dito. Dopo questa procedura, mettiamoli uno accanto all'altro lungo lo stesso piano, con il pendolo vicino al bordo destro *B* del rettangolo. La parte del disco più vicina al cartoncino deve essere distante da esso dai 2 ai 5 cm (Figura 7.12 (a)).

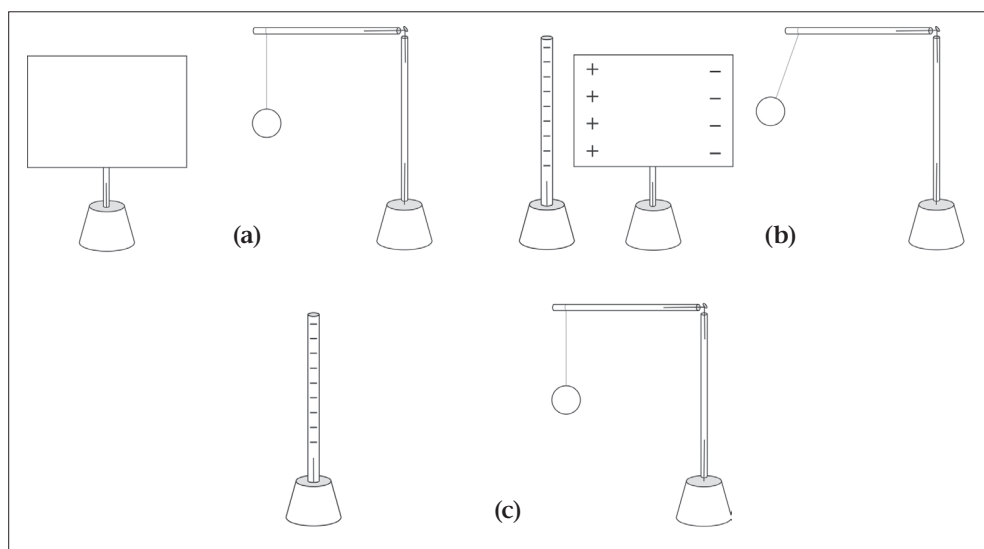



Figura 7.12. **(a)** Un pendolo neutro è sospeso verticalmente vicino ad un rettangolo conduttore neutro (bordo sinistro *A* e bordo destro *B*). **(b)** Quando una cannuccia strofinata è portata in prossimità di un bordo del rettangolo, il pendolo è attratto dall'altro bordo. (c) Quando togliamo il rettangolo conduttore, il pendolo torna alla verticale.

Elettrizziamo una cannuccia di plastica negativamente sfregando tutta la sua lunghezza tra i nostri capelli e poi la collochiamo verticalmente su un supporto. Appoggiamo quest'ultimo sullo stesso piano di lavoro su cui si trova il cartoncino, dal lato opposto rispetto al pendolo e lontana da entrambi. Poi avviciniamo lentamente la cannuccia al bordo sinistro *A* del rettangolo. Quando essa è abbastanza vicina, il pendolo si inclina verso il rettangolo (Figura 7.12 (b)). Non dobbiamo avvicinare troppo la cannuccia al rettangolo, per impedire il contatto tra il disco e il rettangolo. Quando allontaniamo la cannuccia, osserviamo che il pendolo ritorna al suo orientamento verticale.

Supponiamo che la cannuccia strofinata sia di nuovo in prossimità del rettangolo, in modo tale che il pendolo sia inclinato verso il cartone, come nella Figura 7.12 (b). Ora rimuoviamo il cartone, senza toccare la cannuccia o il pendolo. Il rettangolo deve essere rimosso in direzione perpendicolare al suo piano. Dopo che il rettangolo è stato rimosso, osserviamo che il pendolo ritorna al suo orientamento verticale (Figura 7.12 (c)).

Questo esperimento mostra che il pendolo è attratto dal cartoncino polarizzato e non dalla cannuccia strofinata, che ne è troppo lontana. La cannuccia elettrizzata è responsabile della polarizzazione del rettangolo conduttore, ma è troppo lontana per influenzare sensibilmente il pendolo.

### Esperimento 7.10

In questo esperimento usiamo il rettangolo di cartoncino dell'Esperimento 7.6, un pendolo elettrico e una cannuccia di plastica. Carichiamo la cannuccia negativamente strofinando tutta la sua lunghezza tra i capelli e quindi posizioniamola verticalmente sul suo supporto. Quando avviciniamo un pendolo neutro alla cannuccia strofinata, osserviamo un'attrazione, se essi sono portati molto vicini tra loro. Questo è indicato dal disco del pendolo che si inclina verso la cannuccia strofinata. D'altra parte, quando la distanza tra la cannuccia strofinata e il disco di carta del pendolo è maggiore o uguale a circa 15 cm, il pendolo rimane verticale. Anche se la cannuccia strofinata può attrarlo, questa forza è così piccola che è appena percettibile (Figura 7.13 (a)).

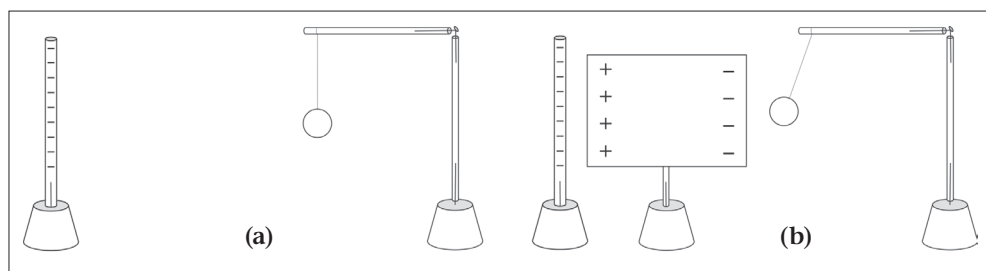



Figura 7.13. **(a)** Una cannuccia negativa alla distanza di 15 cm da un pendolo neutro. **(b)** Quando mettiamo un rettangolo conduttore tra di loro, osserviamo che il pendolo ne è attratto.

Supponiamo ora che la cannuccia verticale strofinata ed il filo verticale del pendolo elettrico neutro siano separati da una distanza di 15 cm, con il cartoncino rettangolare lontano da loro, come nella Figura 7.13 (a). Posizioniamo poi il cartoncino, con dimensioni di 10 × 7 cm, nel piano che collega la cannuccia e il filo del pendolo, ma con i loro piani ben separati l'uno dall'altro. Dopodiché, muoviamo il rettangolo in direzione perpendicolare al suo piano, in modo tale che esso si vada a porre tra la cannuccia strofinata e il pendolo, tutti nello stesso piano (Figura 7.13 (b)). Osserviamo che il pendolo è attratto dal rettangolo, inclinandosi verso di esso. Per il momento eviteremo di portarli in contatto.

Gli Esperimenti 7.9 e 7.10 mostrano un nuovo tipo di attrazione. Finora abbiamo visto che un corpo carico (conduttore o isolante) attrae corpi neutri. In questo caso, invece, la cannuccia strofinata è lontana dal pendolo e non lo attrae in modo abbastanza forte per causare l'inclinazione del pendolo verso di essa. Ma nella Sezione 7.3, abbiamo visto che un rettangolo conduttore si polarizza se posto vicino alla cannuccia strofinata. Questa separazione di cariche lungo la piastra rettangolare è illustrata nella Figura 7.13 (b). La piastra non ha alcuna carica totale. La somma delle sue cariche positive (vicino alla cannuccia strofinata) e delle sue cariche negative (al bordo più lontano) è uguale a zero. Nonostante questo fatto, essa attira un pendolo neutro posizionato vicino al suo lato negativo. Ciò è indicato dall'inclinazione del pendolo nella Figura 7.13 (b). Poiché le cariche negative della piastra sono più vicine al disco del pendolo rispetto alle cariche positive della piastra, il pendolo è attratto dal rettangolo. Cioè, l'influenza sul disco delle cariche negative vicine è maggiore dell'influenza opposta delle cariche positive lontane.

Come vedremo nell'Appendice B, questo nuovo tipo di attrazione fu riconosciuto e scoperto come un tipico fenomeno elettrico da Stephen Gray nel 1729. Anche se scoprì questo nuovo tipo di attrazione, egli non sapeva della polarizzazione del conduttore, né aveva la nostra moderna interpretazione dei suoi esperimenti. L'interpretazione odierna è dovuta essenzialmente ad Epino. Ciò che deve essere tenuto a mente è che anche se il rettangolo conduttore possiede una carica complessivamente nulla, esso può attrarre un corpo neutro *II* che è vicino ad uno dei suoi lati, a condizione che il rettangolo sia polarizzato da un corpo carico *I* messo nei pressi del lato opposto.

### Esperimento 7.11

In questo esperimento utilizziamo di nuovo il rettangolo di cartoncino dell'Esperimento 7.6, un pendolo elettrico ed una cannuccia.

Strofiniamo la cannuccia tra i capelli e carichiamo il disco di carta del pendolo elettrico attraverso il meccanismo ACR, come descritto nella Sezione 4.8. Quando noi avviciniamo la cannuccia strofinata al pendolo carico osserviamo una repulsione, come indicato dall'inclinazione del pendolo rispetto alla verticale. Invece, quando la distanza tra la cannuccia strofinata e il disco di carta del pendolo è maggiore o uguale a 15 cm, il pendolo rimane verticale. Sebbene entrambi siano caricati negativamente, la forza di repulsione a questa distanza è troppo piccola per essere facilmente rilevata (Figura 7.14 (a)).

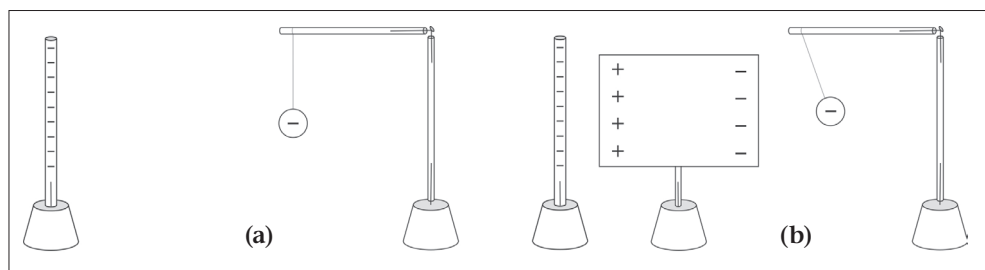



Figura 7.14. **(a)** Una cannuccia carica negativamente non influisce notevolmente su un pendolo carico negativamente che è lontano da essa. **(b)** Quando un conduttore rettangolare inizialmente neutro è posto tra di loro, si verifica una repulsione.

Avviciniamo ora la cannuccia strofinata, muovendola in verticale, ad uno dei bordi del cartoncino rettangolare, impedendo loro di entrare in contatto. Allineiamo la cannuccia strofinata, il rettangolo di cartoncino ed il pendolo carico. La cannuccia carica rimane vicino a un bordo verticale del rettangolo ed il pendolo è inizialmente lontano dall'altro bordo. Portiamo ora lentamente il pendolo verso il rettangolo. Osserviamo che il pendolo ne viene respinto. Questa repulsione aumenta quando diminuiamo la distanza tra loro. Quando vi è una distanza di 15 cm tra la cannuccia strofinata e la verticale passante per il punto di attacco del filo di seta del pendolo, questo filo sarà visibilmente allontanato, poiché viene respinto dal rettangolo inserito tra la cannuccia e il pendolo (Figura 7.14 (b)).

Ora rimuoviamo il rettangolo, mantenendo la cannuccia strofinata e il pendolo fissi dove stanno. Il rettangolo deve essere rimosso traendolo in avanti o indietro sul piano d'appoggio. Dopo che il rettangolo è stato rimosso, si osserva che il pendolo carico ritorna alla direzione verticale e resta a 15 cm da esso.

Questo esperimento è un'altra prova della polarizzazione del rettangolo conduttore in presenza della cannuccia strofinata.

### Esperimento 7.12

È possibile eseguire un esperimento analogo all'Esperimento 7.11 utilizzando un cartoncino come quello dell'Esperimento 7.6, una cannuccia di plastica strofinata ed un pendolo elettrico scarico. La cannuccia strofinata viene posizionata in verticale vicino ad un bordo del cartoncino (quello di sinistra, per esempio), con il pendolo scarico lontano da esso, ma nello stesso piano verticale (Figura 7.15(a)).

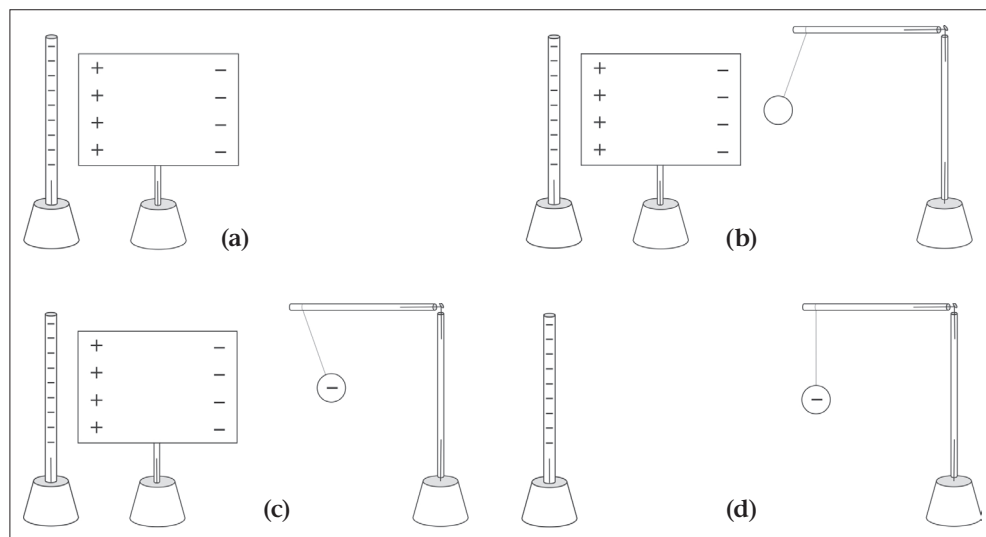



Figura 7.15. **(a)** Rettangolo conduttore accanto ad una cannuccia carica. **(b)** Un pendolo neutro, messo vicino, ne è attratto. **(c)** Dopo il contatto, il pendolo ne è respinto. **(d)** Quando il cartoncino è rimosso, il pendolo negativo penzola verticalmente, dal momento che è lontano dalla cannuccia negativa.

Ora portiamo lentamente il pendolo verso il bordo destro del rettangolo. Ad una certa distanza da esso, osserviamo che il disco di carta del pendolo ne è attratto, come nella Figura 7.15 (b).

Quando la cannuccia carica viene portata ancora più vicino al bordo sinistro del rettangolo, il disco lo tocca e comincia ad esserne respinto a causa del meccanismo ACR. Arriviamo quindi ad una situazione analoga a quella della Figura 7.14, come mostrato in Figura 7.15 (c).

Rimosso il rettangolo, il pendolo torna alla verticale (Figura 7.15 (d)). Quando la cannuccia strofinata viene avvicinata al pendolo, si verifica una repulsione. Questo indica che entrambi i corpi (la cannuccia ed il pendolo) sono elettrizzati con cariche dello stesso segno.

### Esperimento 7.13

Un esperimento analogo all'Esperimento 7.12 consiste nello spostamento di un pendolo elettrico inizialmente scarico in prossimità del bordo di un rettangolo conduttore scarico, senza toccarlo. Il pendolo rimane verticale. Ora portiamo lentamente una cannuccia strofinata verticale vicino all'altro bordo del rettangolo. Ad una certa distanza il pendolo comincia ad essere attratto da quest'ultimo, lo tocca e ne è quindi respinto. Ora togliamo il rettangolo. Quando la cannuccia carica viene avvicinata al pendolo, si verifica una repulsione. Questo indica che entrambi hanno cariche dello stesso segno.

## 7.5 Utilizzo della polarizzazione per caricare un elettroscopio

Finora abbiamo visto come caricare un corpo positivamente o negativamente per strofinio. Inoltre, quando si usa il meccanismo ACR, abbiamo visto come elettrizzare un conduttore con una carica dello stesso segno di quella di un corpo precedentemente strofinato. Ora, per descrivere un terzo meccanismo di elettrizzazione, utilizziamo la polarizzazione elettrica dei conduttori, insieme con il fatto che le cariche si muovono liberamente sulla loro superficie.

**Definizioni:** Secondo le definizioni presentate nella Sezione 7.3, i meccanismi di carica descritti in questa Sezione sono chiamati *elettrizzazione per induzione*, *carica per induzione*, *caricamento per induzione*, *elettrizzazione per influenza*, *carica per influenza* o *caricamento per influenza*.

### 7.5.1 Prima procedura di elettrizzazione per induzione

**Esperimento 7.14**

Costruiamo due elettroscopi con rettangoli di cartoncino di dimensioni 10 x 7 cm, *A* e *B*, come abbiamo fatto nella Sezione 6.1. I lati più lunghi saranno verticali. Strisce di carta velina sono attaccate al centro della parte superiore di questi elettroscopi. Questi due elettroscopi vengono ora collocati fianco a fianco in un unico piano verticale, con i lati più vicini che si toccano l'un l'altro, come mostrato nella Figura 7.16 (a). Scarichiamoli per contatto con il dito. Le due strisce rimangono verticali. Strofiniamo una cannuccia di plastica tra i capelli in modo che riceva una buona elettrizzazione, come indicato dal test del muro nell'Esperimento 3.6. Questa cannuccia strofinata viene in seguito fissata verticalmente su di un sostegno adeguato e inizialmente posta lontana dagli elettroscopi.

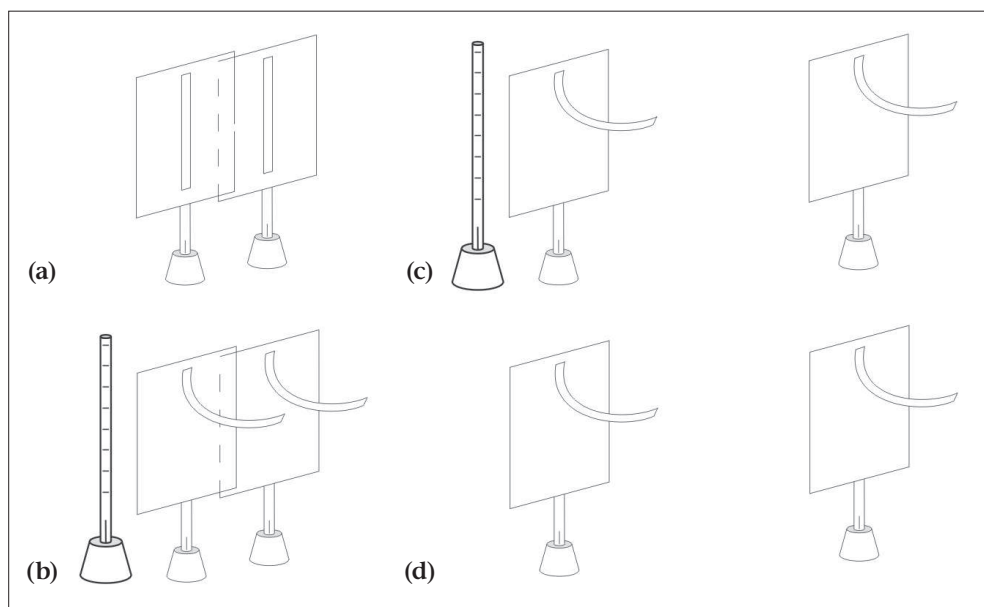



Figura 7.16. Prima procedura di caricamento per induzione.

Portiamo lentamente questa cannuccia strofinata vicino al bordo verticale libero dell'elettroscopio *A*, senza metterli in contatto. Essa deve rimanere vicina a questo bordo, con l'elettroscopio *A* tra essa e l'elettroscopio *B*. Le due strisce si sollevano, indicando che ciascun elettroscopio è diventato carico come mostrato nella Figura 7.16 (b).

Mantenendo la cannuccia strofinata in prossimità del bordo libero dell'elettroscopio *A*, allontaniamo l'elettroscopio *B* da quest'ultimo. Dobbiamo però fare attenzione a toccare solo la cannuccia di plastica, o il sostegno che regge il cartoncino dell'elettroscopio *B*, senza toccare quest'ultimo o la sua striscia. Osserviamo che le due strisce rimangono sollevate, come mostrato in Figura 7.16 (c).

Dopo questa procedura, allontaniamo la cannuccia strofinata da entrambi gli elettroscopi. Osserviamo a questo punto che le due strisce rimangono sollevate, come mostrato in Figura 7.16 (d), il che indica che gli elettroscopi sono carichi.

Ora manteniamo in orizzontale la cannuccia strofinata, alla stessa altezza delle estremità inferiori delle strisce sollevate degli elettroscopi. Quando poi l'avviciniamo alla striscia dell'elettroscopio *B*, evitandone il contatto, si osserva una repulsione della striscia. La striscia quindi si allontana dalla cannuccia, in direzione del cartoncino dell'elettroscopio *B*. Ciò dimostra che quest'ultimo si è elettrizzato con una carica dello stesso segno della cannuccia strofinata.

Quando la cannuccia viene portata lentamente vicino alla striscia dell'elettroscopio *A*, senza entrarne in contatto, si verifica un'attrazione. Cioè, questa striscia si muove verso la cannuccia, allontanandosi dal rettangolo del suo elettroscopio. Ciò indica che questo elettroscopio si è elettrizzato con una carica di segno opposto alla cannuccia.

Ora togliamo la cannuccia. Poniamo i due elettroscopi in piani paralleli, uno di fronte all'altro, con le strisce che puntano una verso l'altra. Avvicinando questi due elettroscopi tra loro, ma impedendo il contatto tra le due strisce, possiamo vedere la loro attrazione reciproca. Questo dimostra ancora una volta che sono di carica opposta (Figura 7.17).

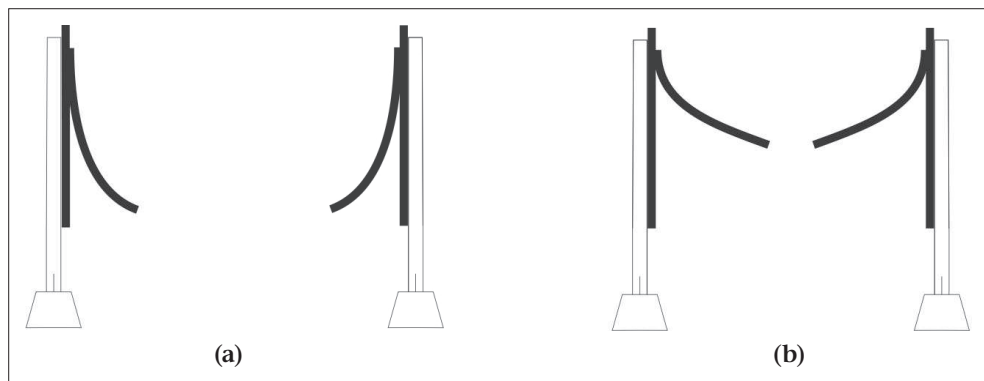



Figura 7.17. Due elettroscopi caricati per induzione diventano elettrizzati in modo opposto.

Questo esperimento offre un'ulteriore prova della polarizzazione elettrica dei conduttori. In questo caso i due elettroscopi *A* e *B*, che inizialmente si toccavano l'un l'altro, si comportano come un unico conduttore. Quando abbiamo posto la cannuccia vicino all'elettroscopio *A*, questo elettroscopio si è caricato di segno opposto ad essa, mentre l'elettroscopio *B* con una carica dello stesso segno. L'elettroscopio *B*, una volta spostato, ha conservato la sua carica. Lo stesso è accaduto all'elettroscopio *A*, quando la cannuccia è stata rimossa.

Questo esperimento mostra anche la conservazione della carica. La ragione è che, inizialmente, i due elettroscopi erano scarichi. Durante gli esperimenti essi sono stati isolati da terra e non li abbiamo toccati con la cannuccia strofinata. Dopo essere stati elettrizzati, uno di essi ha ricevuto una carica positiva e l'altro una carica negativa. Questo esperimento mostra anche che le cariche elettriche possono muoversi liberamente sulla superficie dei conduttori. Esso mostra inoltre che possiamo separare spazialmente cariche positive e negative, rispettivamente accumulate in elettroscopi separati.

### 7.5.2 Seconda procedura di elettrizzazione per induzione

**Esperimento 7.15**

Descriviamo ora una seconda procedura di elettrizzazione per induzione.

La striscia su un elettroscopio inizialmente scarico punta verticalmente verso il basso. Strofiniamo a fondo una cannuccia di plastica tra i capelli per ottenere una buona quantità di carica, come nell'Esperimento 3.6. Questa cannuccia strofinata sia fissata verticalmente ad un appropriato supporto, lontano dall'elettroscopio.

Avviciniamo lentamente la cannuccia strofinata ad uno dei bordi dell'elettroscopio, impedendo che vengano in contatto. La sua striscia si solleva e resta sollevata.

Mentre reggiamo in tal modo la cannuccia strofinata, tocchiamo l'altro bordo con il nostro dito. La striscia cade e resta rivolta verso il basso.

Mentre manteniamo ancora la cannuccia strofinata vicino ad un bordo dell'elettroscopio, togliamo il dito dall'altro bordo. La striscia rimane rivolta verso il basso.

Ora allontaniamo la cannuccia strofinata dall'elettroscopio. Quando la cannuccia viene rimossa, la striscia si solleva e rimane sollevata! Ciò indica che questa procedura ha caricato l'elettroscopio. Queste cinque fasi sono illustrate in Figura 7.18.

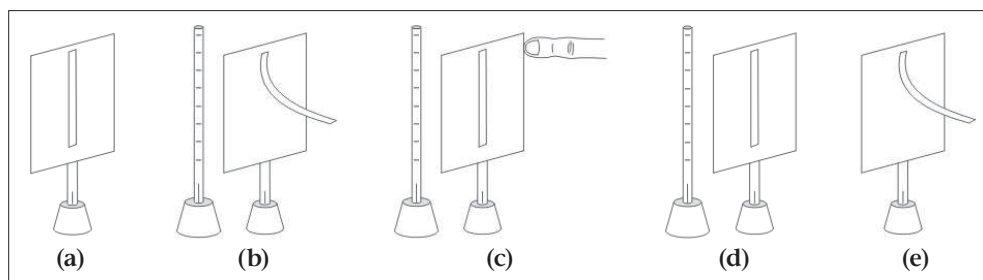



Figura 7.18. Seconda procedura per caricare un elettroscopio per induzione.

La cannuccia strofinata è ora posizionata in orizzontale alla stessa altezza dell'estremità inferiore della striscia sollevata. Portiamola lentamente vicino a questa striscia, impedendo loro di venire in contatto. Osserviamo che esse si attraggono, con la striscia che si muove verso la cannuccia e lontano dal rettangolo dell'elettroscopio. Spostando la cannuccia strofinata verso l'alto, possiamo persino causare che l'estremità libera della striscia superi il bordo superiore dell'elettroscopio (Figura 7.19).

Figura 7.19. Cannuccia negativamente carica che attira la striscia dell'elettroscopio di Figura 7.18 dopo l'esperimento.

Ciò indica che l'elettroscopio si è elettrizzato con una carica di segno opposto rispetto alla cannuccia strofinata.

Possiamo ora descrivere quello che è successo, usando i risultati precedenti. Quando la cannuccia strofinata si approssima ad uno dei bordi dell'elettroscopio, questo si polarizza elettricamente. Il bordo vicino alla cannuccia acquisisce una carica di segno opposto rispetto alla cannuccia, mentre l'altro bordo si carica dello stesso segno di questa. Toccando il bordo libero dell'elettroscopio, abbiamo scaricato l'elettricità che si era intanto accumulata su questo lato. Poiché la cannuccia è rimasta vicina all'altro bordo, le cariche su quest'ultimo sono rimaste di fronte alla cannuccia, a causa della loro attrazione reciproca. Cioè, esse non sono state scaricate dal tocco del nostro dito avvenuto sull'altro bordo. Quando abbiamo tolto il dito, nulla è cambiato per le cariche sul primo bordo. Abbiamo

poi finalmente messo via la cannuccia carica. Ciò fatto, le cariche che erano concentrate sul primo bordo si sono sparse su tutto l'elettroscopio. Ciò ha causato il sollevamento della striscia. Questa distribuzione di cariche è illustrata in Figura 7.20.

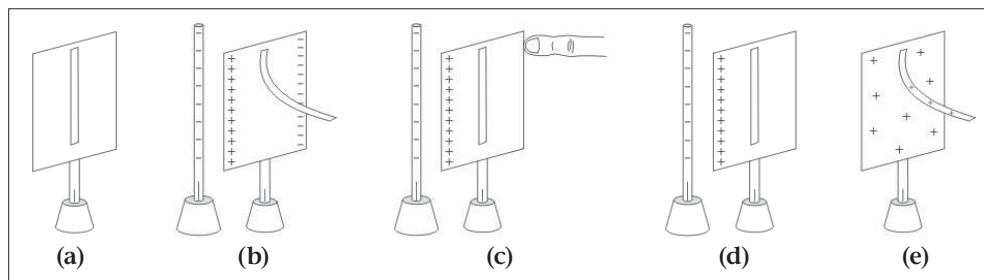



Figura 7.20. Distribuzione delle cariche di Figura 7.18.

Con questo esperimento si ottiene un effetto opposto rispetto agli Esperimenti 6.2 e 6.5 dove, quando caricavamo un elettroscopio per attrito o per contatto, esso acquisiva una carica dello stesso segno del corpo che lo caricava. In questo esperimento, al contrario, l'elettroscopio ha acquisito una carica di segno opposto rispetto al corpo strofinato postogli accanto.

Il cartoncino dell'elettroscopio, neutro al principio del processo, è diventato carico alla fine. Per ottenere ciò abbiamo utilizzato la seguente procedura. Inizialmente abbiamo polarizzato l'elettroscopio in presenza di un corpo carico. Poi abbiamo collegato a terra l'estremità libera dell'elettroscopio ed in seguito rimosso tale contatto. E, al termine, abbiamo rimosso il corpo strofinato. La messa a terra è stata necessaria per neutralizzare la carica accumulata all'estremità libera del conduttore a causa della sua polarizzazione. Il risultato finale è che l'elettroscopio è carico. In questo caso l'effetto della messa a terra è stato quello di caricarlo! Questo dimostra che la messa a terra non sempre scarica un corpo, come è avvenuto nell'Esperimento 4.9.

### 7.5.3 Terza procedura di elettrizzazione per induzione

**Esperimento 7.16**

L'Esperimento 7.15 può essere realizzato in altro modo utilizzando nuovamente un elettroscopio. Inizialmente mettiamo a terra un bordo del elettroscopio toccandolo con il dito o connettendolo a terra con un pezzo di filo metallico. Mentre questo bordo è così collegato, avviciniamo una cannuccia strofinata all'altro lato dell'elettroscopio, senza toccarlo. Mentre la cannuccia è vicina a questo secondo bordo, rimuoviamo la messa a terra dal primo bordo. Allontaniamo quindi la cannuccia e osserviamo che al termine del processo questo elettroscopio si è elettrizzato, come indicato dalla sua striscia sollevata (Figura 7.21). Quando testiamo il segno della carica acquisita dall'elettroscopio, vediamo che essa è opposta alla carica sulla cannuccia.

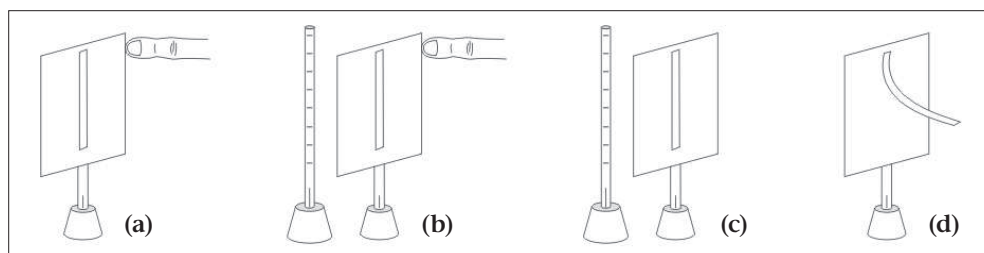



Figura 7.21. Terza procedura per caricare un elettroscopio per induzione.

La distribuzione di cariche in questo esperimento è illustrata in Figura 7.22.

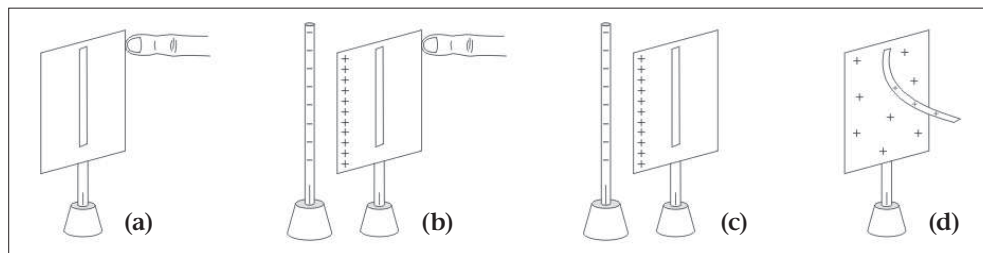



Figura 7.22. Distribuzione delle cariche di Figura 7.21.

## 7.6 La polarizzazione elettrica di isolanti

Ora vedremo altre differenze tra conduttori e isolanti.

### Esperimento 7.17

Ripetiamo ora l'Esperimento 7.11 con una lastra di polistirolo neutro di dimensioni 10 × 7 cm, al posto del rettangolo di cartoncino. Il polistirolo è un isolante, mentre il cartoncino è un conduttore. Strofiniamo una cannuccia di plastica tra i capelli e, attraverso il meccanismo ACR, carichiamo con essa un pendolo, che così diventa anch'esso negativamente carico.

Quando la cannuccia strofinata è ad una distanza maggiore o uguale a 15 cm dal pendolo carico, il filo di seta rimane in verticale. La loro repulsione è troppo piccola per essere rilevata. Invece, quando questa distanza è di 15 cm e quando la lastra di polistirolo è posta tra la cannuccia strofinata e il pendolo, osserviamo che il pendolo carico viene respinto dalla lastra.

Tale repulsione non può essere attribuita direttamente alla cannuccia strofinata, in quanto essa si trova ad una grande distanza dal pendolo. Ciò significa che essa deve essere causata dalla polarizzazione del polistirolo. Cioè, il bordo del polistirolo più vicino alla cannuccia strofinata diventa carico positivamente, mentre il bordo lontano diventa carico negativamente. Ad indicarlo è la repulsione del pendolo carico negativamente da noi osservata quando questo si trova ad una distanza superiore a 15 cm dalla cannuccia strofinata.

### Esperimento 7.18

Costruiamo ora un *pendolo elettrico di plastica*, chiamato anche pendolo di plastica (Figura 7.23).

Figura 7.23. Pendolo elettrico di plastica.

Nel pendolo elettrico usuale, quello della Sezione 4.4, abbiamo un disco di carta all'estremità inferiore del filo di seta. La carta è un conduttore. Nel pendolo elettrico di plastica sostituiamo il disco di carta con un isolante. La maggior parte delle materie plastiche si comporta da isolante. Tuttavia, alcune di loro si comportano come conduttori. Ciò può essere dovuto all'umidità accumulata sulle loro superfici, o può essere anche dovuto alla loro composizione chimica. Pertanto, inizialmente dovremmo scegliere un sac-

chetto di plastica che non scarichi un elettroscopio elettrizzato, allorché la plastica che abbiamo in mano tocca il bordo superiore del cartoncino. Sarà utilizzato quest'ultimo materiale isolante per costruire il pendolo elettrico di plastica.

A tal fine, tagliamo un disco di 1 o 2 cm di diametro da un sacchetto di plastica sottile. Facciamo un buco con un ago in questo dischetto ed annodiamo attraverso il buco un filo di seta o di nylon.

Prima di iniziare l'esperimento è importante verificare se il pendolo di plastica sia davvero neutro. Per sapere se è carico, si passa un dito vicino ad esso e si osserva se il disco di plastica rimane in verticale a riposo. Se ciò accade, diciamo che è neutro. Se il disco di plastica, invece, è attratto dal dito, diciamo che è carico. Scartiamo allora questo pendolo che risulta carico e ne costruiamo uno nuovo, che sia davvero neutro. Spesso il pendolo di plastica può essere caricato involontariamente, attraverso la manipolazione, quando tagliamo il disco o lo leghiamo.

Strofiniamo una cannuccia di plastica tra i capelli e portiamola vicino ad un pendolo di plastica neutro. Il disco di plastica è attratto dalla cannuccia strofinata. Ma questa attrazione è molto più piccola di quella, simile, che si notava col disco di carta di un pendolo elettrico ordinario. Questa forza è indicata dall'angolo di inclinazione del disco rispetto alla verticale quando la cannuccia strofinata è alla stessa distanza da entrambi i pendoli.

Se lasciamo che la cannuccia strofinata e il disco di plastica di detto pendolo entrino in contatto, essi si attaccheranno. Ciò significa che il fenomeno ACR descritto nell'Esperimento 4.10 e nella Sezione 4.8 non si verifica con un pendolo di plastica. La sequenza di attrazione, contatto, e repulsione normalmente si verifica solo per un conduttore. Quando il corpo che viene attratto è un isolante neutro, esso può toccare il corpo attraente senza essere respinto da esso in seguito. Il meccanismo ACR per un isolante viene osservato solo dopo diversi contatti con il corpo strofinato o quando strisciamo il corpo strofinato sull'isolante.

Questa è una differenza importante tra conduttori e isolanti. Per caricare un isolante come la plastica, abbiamo bisogno di strofinarla, come nell'Esperimento 2.1. Un conduttore, invece, può essere caricato non solo per strofinio, come abbiamo visto negli Esperimenti 6.2 e 6.24, ma anche attraverso il meccanismo ACR. In questo caso il contatto tra un conduttore e un corpo precedentemente caricato è generalmente sufficiente per trasferire una parte della carica del corpo elettrizzato al conduttore.

**Esperimento 7.19**

Ripetiamo l'Esperimento 7.3 con un disco neutro di plastica dura o con un disco di polistirolo, invece di usare un disco di cartoncino. Questa volta, quando togliamo i piani di prova di Coulomb per testare le loro cariche, troviamo che nessuno di loro si è elettrizzato.

Tuttavia, abbiamo visto nell'Esperimento 7.17 che il polistirolo diventa elettricamente polarizzato in presenza di una cannuccia strofinata. Questo dimostra che la polarizzazione che avviene in un isolante è diversa dalla polarizzazione di un conduttore.

## 7.7 Un corpo elettrizzato attira di più un conduttore o più un isolante?

In questa Sezione prenderemo in esame una questione interessante. In primo luogo elettrizziamo una cannuccia di plastica strofinandola tra i capelli. Poniamo un piccolo conduttore leggero e un piccolo isolante leggero su di un tavolo, separati l'uno dall'altro. Supponiamo che questo conduttore e questo isolante abbiano lo stesso peso e la stessa dimensione. Quando avviciniamo la cannuccia strofinata al conduttore e all'isolante, quale sarà attratto di più? Vale a dire, su quale eserciterà maggior forza una cannuccia elettrizzata?

Negli Esperimenti 2.3 e 2.4 abbiamo visto che una plastica strofinata attira materiali conduttori (come la carta e metallo) più vigorosamente di isolanti dello stesso peso, dimensione e forma (come plastica o seta).

**Esperimento 7.20**

In questo esperimento illustriamo la seguente proprietà: la forza esercitata da un vicino corpo elettrizzato è maggiore per un conduttore che per un isolante. Non abbiamo bisogno di pesare il conduttore o l'isolante. Per fare questo, usiamo due pendoli di plastica della stessa dimensione e forma, realizzati con gli stessi materiali (Figura 7.23). Nel pendolo *II* viene attaccato al disco di plastica un disco di carta o un disco di alluminio. A causa del materiale aggiuntivo che è stato attaccato ad esso, esso pesa più del pendolo *I* al quale nulla è stato aggiunto.

Prima di iniziare l'esperimento, avviciniamo un dito a entrambi i pendoli. Se essi non sono attratti dal dito, vuol dire che non sono stati elettrizzati durante la loro costruzione. Questo non lo si ottiene sempre poiché il pendolo di plastica può facilmente acquisire una carica durante la sua costruzione (attrito con la nostra mano durante il taglio o mentre leghiamo il disco di plastica al filo di seta). Se questo accade, vi è una semplice procedura per scaricare il pendolo. Abbiamo solo bisogno di aspettare un periodo di tempo abbastanza lungo (alcune ore), fino a quando il disco di plastica perde questa carica a causa dell'aria circostante. Nella Sezione 7.14 discuteremo questo argomento in modo più approfondito.

D'ora in poi assumeremo che i due pendoli siano neutri.

Avviciniamo ora una cannuccia strofinata a entrambi i pendoli, sempre evitando che la cannuccia e i dischi dei pendoli entrino in contatto. Il pendolo di plastica è leggermente attratto dalla cannuccia strofinata (Figura 7.24 (a)). Il pendolo con il disco di carta, invece, è molto più fortemente attratto rispetto al pendolo di plastica (Figura 7.24 (b)). Questa forza è indicata dall'angolo di inclinazione di ciascun pendolo rispetto alla verticale (supponendo la cannuccia elettrizzata alla stessa distanza). Sebbene il pendolo *II* sia più pesante del pendolo *I*, esso sperimenta una maggiore forza attraente.

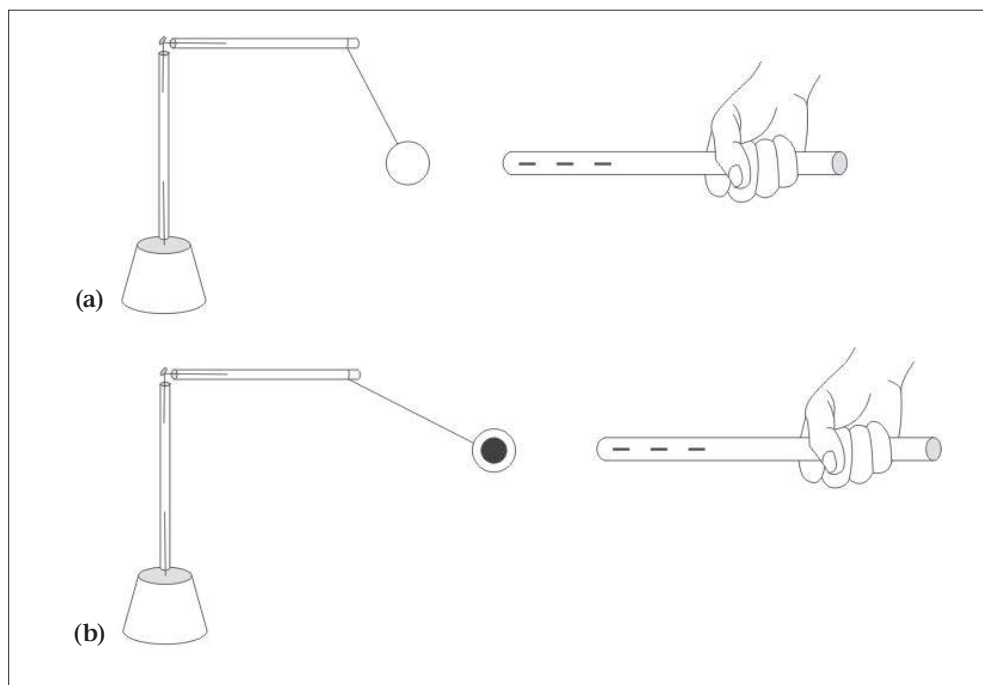



Figura 7.24. **(a)** Un pendolo di plastica è debolmente attratto da una cannuccia strofinata. **(b)** Un pendolo di plastica a cui è stato aggiunto un disco conduttore, invece, è fortemente attratto dalla cannuccia strofinata, nonostante il suo peso maggiore.

### Esperimento 7.21

Un esperimento analogo può essere eseguito con due pendoli in cui sostituiamo i dischi di plastica con piccole sfere di polistirolo. Come la plastica, anche il polistirolo è un materiale isolante. Poniamo le sfere della stessa dimensione su entrambi i pendoli. Dopo questa procedura, copriamo il pendolo *II* con un foglio di alluminio. Passiamo poi una cannuccia strofinata in prossimità di entrambi i pendoli. Osserviamo che il pendolo col foglio di alluminio è attratto di più rispetto al pendolo *I*, al quale niente è stato aggiunto.

### Esperimento 7.22

Ora costruiamo due "fili penduli isolanti", come in Figura 7.25. Essi sono analoghi al filo pendulo di Gray (Figura 4.28). Ma ora allo spiedino di legno sostituiamo una cannuccia e al filo di cotone una striscia di plastica flessibile. Entrambi i fili penduli isolanti devono avere la stessa lunghezza e forma, ed essere fatti dello stesso materiale. Ora avvolgiamo la striscia di plastica del pendolo *II* con un filo di cotone leggero, disposto ad elica attorno ad essa. Quando tutto è pronto verifichiamo se entrambi i fili penduli siano neutri prima di iniziare l'esperimento.

Figura 7.25. Un filo pendulo isolante.

Avviciniamo una cannuccia strofinata ad entrambi i fili penduli. Osserviamo che il filo pendulo *II* con il filo di cotone conduttore è attratto maggiormente rispetto al filo pendulo *I* a cui nulla è stato aggiunto (Figura 7.26). Sebbene il filo pendulo *I* sia più leggero del filo pendulo *II*, esso è meno intensamente attratto rispetto al secondo.

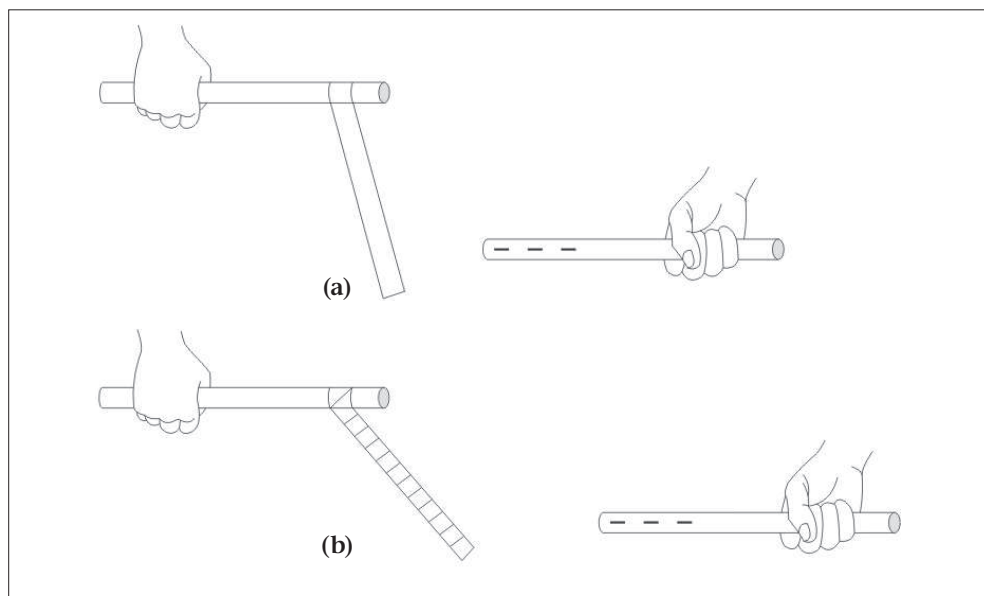



Figura 7.26. **(a)** Un filo pendulo isolante è meno attratto da un corpo elettrizzato rispetto ad un altro filo pendulo isolante a cui è stato aggiunto un filo conduttore **(b)**.

Questi esperimenti dimostrano che un conduttore sperimenta una forza maggiore rispetto ad un isolante, quando entrambe le forze vengono esercitate dallo stesso corpo elettrizzato. Du Fay ed Epino sono tra i ricercatori che hanno scoperto questo fatto sperimentalmente[6].

### 7.7.1 Discussione sul pendolo elettrico di Gray

Come accennato nella Sezione 4.6, nel 1720 Gray descrisse un pendolo elettrico ottenuto legando una piuma ad un filo di seta, a sua volta attaccato ad un bastone. A quel tempo nessuno conosceva la distinzione tra conduttori e isolanti. Ciò significa che il suo uso del filo di seta fu una coincidenza. La seta è un materiale isolante. Comunque, Gray avrebbe potuto impiegare ugualmente un filo di lino o cotone, entrambi conduttori, ma invece usò quello di seta. Gray riscaldò un pezzo di carta da pacchi (trasformando questa carta in isolante) e la caricò per attrito. Avvicinata questa sottile carta alla piuma attaccata al filo di seta, egli notò che poteva alzarla fino a mettere il filo di seta in orizzontale, cioè perpendicolare al bastone verticale. Sollevando la carta da pacchi strofinata ancora più in alto, egli si rese conto che poteva fare in modo che il filo di seta si tendesse sopra il piano orizzontale, rimanendo sospesa in aria verso l'alto, come nella Figura 4.21 (c). Dopo aver eseguito questo esperimento egli si espresse così[7]:

> Ho poi ripetuto questo esperimento senza la piuma, vale a dire usando solo un unico filo di seta di circa 5 o 6 pollici di lunghezza [13 o 15 cm], che è stato fatto stendere verso l'alto come prima indicato, senza che toccasse la carta [strofinata e riscaldata]; [...]

Un esempio di questo esperimento appare nella Figura 7.27.

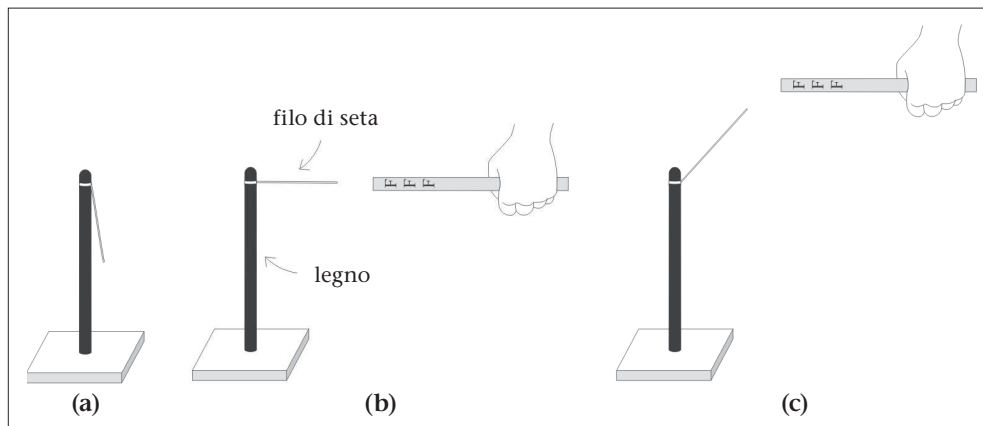



Figura 7.27. Gray che attrae un filo di seta avvicinando ad esso un pezzo di carta strofinata.

Questo dimostra che la piuma aveva solo un ruolo secondario in questo esperimento, poiché egli avrebbe potuto sollevare il filo di seta anche senza la piuma. Ci sono due possibili spiegazioni per questo effetto curioso. La prima è che, legando la piuma al filo di seta o slegandola, la seta si era comportata come isolante ed era stata caricata alla sua estremità inferiore per strofinio con le mani. La carta da pacchi riscaldata e strofinata, inoltre, potrebbe essere stata elettrizzata con una carica di segno opposto rispetto alla carica della seta. Quando Gray avvicinò questi due materiali, essi si attirarono l'un l'altro. Gray poté quindi sollevare il filo di seta sopra il piano orizzontale. La seconda possibilità è che, legando e sciogliendo la piuma, il filo di seta possa essere diventato umido, forse a causa del sudore dalle mani di Gray. Se così fosse stato, il filo di seta allora si sarebbe comportato come un conduttore. Quando egli avvicinò la carta da pacchi riscaldata e strofinata al filo, il filo conduttore potrebbe esserne stato polarizzato.

Cioè, la sua estremità inferiore, più vicina alla carta carica, avrebbe acquisito una carica di segno opposto. Grazie alla forte attrazione tra le cariche della carta e le cariche situate all'estremità libera del filo, Gray sarebbe stato in grado di sollevare il filo al di sopra del piano orizzontale. Ciò sarebbe stato analogo al nostro Esperimento 6.6.

Se il filo di seta fosse stato asciutto e scarico, esso si sarebbe comportato come un usuale isolante neutro. In questo caso Gray non sarebbe stato in grado di sollevarlo sopra il piano orizzontale, anche portando la carta da pacchi carica vicino al filo. Normalmente l'attrazione tra un corpo carico e un isolante neutro è molto più debole dell'attrazione tra un corpo carico e un conduttore neutro. Essa è anche molto più debole dell'attrazione tra due corpi di carica opposta.

## 7.8 Forze di origine non-elettrostatica

Come abbiamo visto nel Capitolo 5, due corpi caricati positivamente si respingono, come fanno anche due corpi caricati negativamente, mentre un corpo positivo ed un corpo negativo si attraggono. A volte questo è espresso dicendo che cariche dello stesso segno si respingono, mentre cariche opposte si attraggono. Le forze elettriche che questi corpi esercitano una sull'altra quando essi sono in quiete sono chiamate forze elettrostatiche.

In tutte le situazioni in cui vi sono due o più cariche in quiete relativa tra loro in una configurazione di equilibrio stabile, sono necessarie forze non-elettrostatiche per equilibrare le forze elettrostatiche esercitate tra le cariche interagenti[8]. Qui illustriamo questo con il caso di una sfera conduttrice negativamente carica. La sfera può essere stata elettrizzata, ad esempio, da una cannuccia di plastica strofinata tra i capelli. Le cariche sul conduttore si respingono a vicenda. Dopo aver raggiunto l'equilibrio, esse sono distribuite uniformemente sulla superficie della sfera (Figura 7.28).

Consideriamo la carica negativa nella parte superiore della sfera. Essa è respinta da tutte le altre cariche negative. Pertanto, essa subisce una forza elettrostatica verticale che punta lontano dal centro della sfera. Per mantenere questa carica negativa in quiete è necessaria una forza di origine non-elettrostatica che punta verso il basso, avente la stessa intensità della forza elettrostatica rivolta verso l'alto. In questa specifica situazione, questa forza non-elettrostatica è talvolta chiamata forza di contatto. Ma la sua origine non è compresa chiaramente. Inoltre non sappiamo come essa sia prodotta, ecc..

La stessa situazione si verifica quando la sfera conduttrice è caricata positivamente. Identico ragionamento vale per una sfera isolante che viene uniformemente elettrizzata, negativamente o positivamente.

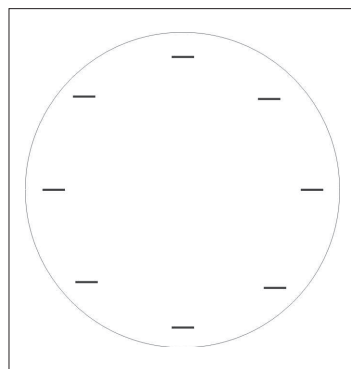



Figura 7.28. Una sfera uniformemente carica.

## 7.9 Modelli microscopici di conduttori e isolanti

Per comprendere tutta la serie di esperimenti che mostra le differenze e le somiglianze tra conduttori e isolanti, di questi corpi è utile creare dei modelli microscopici. Essi ci aiuteranno a comprendere e a visualizzare i processi qui descritti. I modelli utilizzano i risultati di esperimenti analoghi a quelli descritti in questo libro. In seguito la procedura viene invertita. Vorrà dire che tali modelli verranno postulati e poi utilizzati per illustrare o descrivere ciò che accade negli esperimenti.

Il loro comportamento porta a due differenti modelli microscopici per i conduttori polarizzati e per gli isolanti polarizzati. Per i conduttori supponiamo l'esistenza di

cariche libere. Partiamo dal presupposto che nei conduttori vi siano cariche che non sono attaccate alle molecole del materiale e sono quindi libere di muoversi attraverso tutto il conduttore. Quando il conduttore è neutro, queste cariche libere non sperimentano nessun movimento macroscopico complessivo e non generano effetti esterni. Invece, quando poniamo un corpo carico nelle sue vicinanze, esso diventa polarizzato. In particolare, la porzione del conduttore che è più vicina al corpo carico si elettrizza di segno opposto ad esso, mentre la parte lontana si elettrizza dello stesso segno (Figura 7.29). Cariche libere così polarizzate possono essere trasferite ad altri conduttori se tali conduttori entrano in contatto con il conduttore polarizzato.

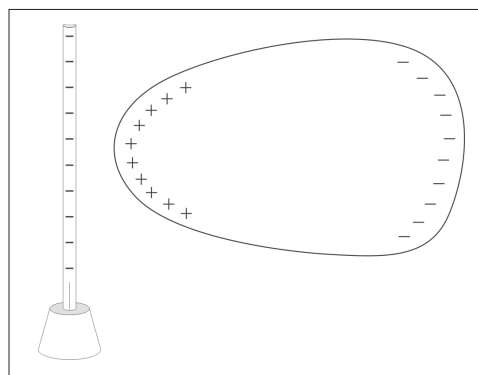



Figura 7.29. Modello microscopico di un conduttore polarizzato idealizzato vicino ad un altro corpo carico.

Assumiamo che esista una forza di origine non-elettrostatica la quale evita che queste cariche libere lascino la superficie del conduttore, salvo in condizioni di scariche elettriche per le quali vi sono cariche che si allontanano dal corpo attraverso l'aria.

La messa a terra di un conduttore in presenza di un corpo carico vicino, come mostrata negli Esperimenti 7.15 e 7.16, è illustrata in Figura 7.30.

(a) (b)

(c)

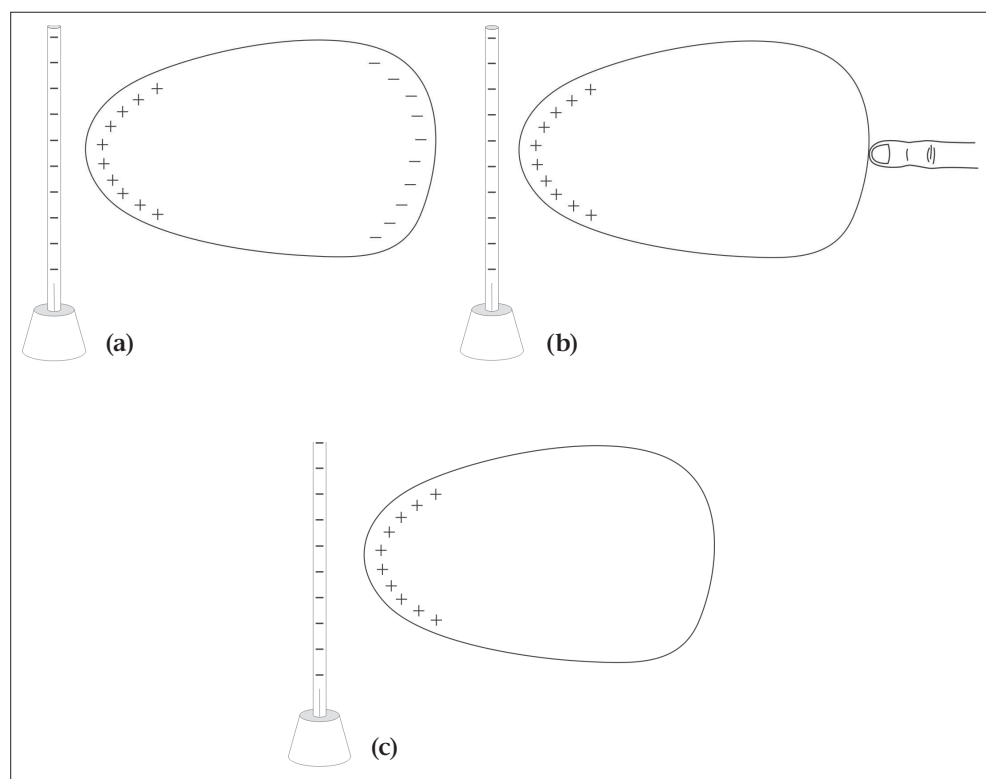



Figura 7.30. Messa a terra di un conduttore in presenza di un vicino corpo carico.

Presentiamo ora il modello microscopico per un isolante. In questo caso supponiamo che quando poniamo un corpo carico nei pressi di un isolante, solo le molecole dell'isolante si polarizzino. Ciò significa che le parti delle molecole dell'isolante che sono più vicine al corpo carico si elettrizzano di segno opposto rispetto al corpo carico. Le parti delle molecole dell'isolante che sono più lontane, invece, diventano cariche dello stesso segno. Per isolanti quindi non ci sarebbe un movimento complessivo di cariche libere, ma solo una polarizzazione delle sue molecole (Figura 7.31 (a)).

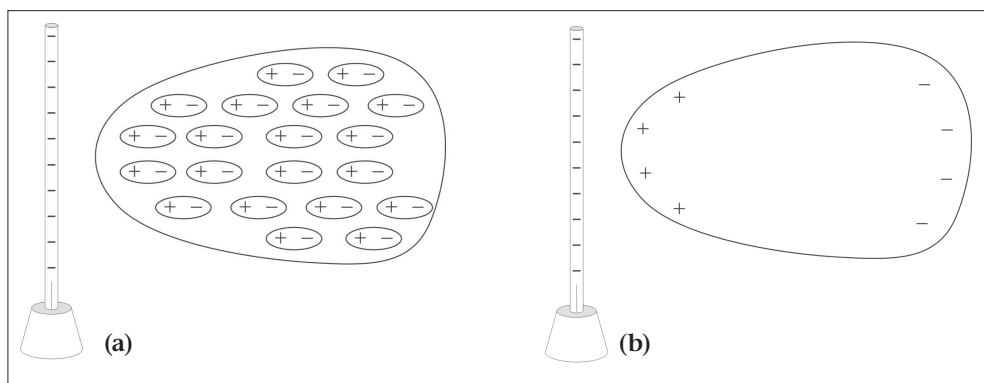



Figura 7.31. **(a)** Modello microscopico di un isolante polarizzato idealizzato alla presenza di un altro corpo carico. **(b)** Polarizzazione effettiva dell'isolante nella situazione **(a)**.

All'interno dell'isolante ci sono quantità uguali di cariche positive e negative, molto vicine l'una all'altra. Considerando ora che ogni suo piccolo volume contiene molte molecole, la somma totale di tali cariche è da ritenersi approssimativamente zero. Questo significa che possiamo valutare l'interno dell'isolante polarizzato come macroscopicamente neutro. Ma non sarà così per la superficie. L'effetto totale di queste polarizzazioni molecolari è che la superficie dell'isolante più vicina al corpo carico si comporta come se fosse stata elettrizzata con cariche di segno opposto rispetto al corpo carico esterno. La superficie dell'isolante più distante dal corpo carico, invece, si comporta come se fosse elettrizzata con cariche dello stesso segno.

La polarizzazione effettiva è illustrata nella Figura 7.31 (b).

Ancora una volta, è necessario supporre una forza di origine non-elettrostatica che trattenga le cariche polarizzate in ogni molecola dal muoversi attraverso l'isolante.

La polarizzazione presentata in Figura 7.29 è maggiore o più intensa della polarizzazione presentata in Figura 7.31 (b). Queste Figure sono state disegnate così intenzionalmente. Stiamo assumendo conduttori e isolanti della stessa forma e dimensioni, entrambi alla stessa distanza da una cannuccia carica e con la stessa intensità. La ragione della quantità di carica in queste Figure è stata data nella Sezione 7.7. Gli esperimenti dimostrano infatti che la forza esercitata da un corpo carico su un conduttore è superiore alla forza esercitata dallo stesso corpo carico su un isolante. Ciò indica che la polarizzazione di un conduttore è maggiore rispetto a quella effettiva di un isolante. L'intensità o grado di questa polarizzazione è rappresentata dal numero di cariche opposte distribuite su entrambi i lati del corpo polarizzato. In un conduttore ci sono più cariche polarizzate che in un isolante, come rappresentato nelle Figure 7.29 e 7.31 (b).

Inoltre, noi aumentiamo il numero di cariche polarizzate nei conduttori e negli isolanti se diminuiamo la loro distanza dal corpo carico più prossimo che ha indotto queste cariche. Accresciamo altresì il numero di cariche polarizzate se aumentiamo l'elettrizzazione del corpo che sta polarizzando il conduttore e l'isolante.

In realtà, nessun corpo è un conduttore perfetto o un isolante perfetto. Di conseguenza, questi modelli microscopici sono idealizzazioni. I corpi reali presentano caratteristiche di entrambi i comportamenti, in misura maggiore o minore. C'è una gradazione tra buoni conduttori e buoni isolanti.

In ogni caso, questi modelli idealizzati sono estremamente utili al fine di aiutare a comprendere e visualizzare ciò che accade in molti fenomeni elettrici.

## 7.10 Possono attrarsi due corpi elettrizzati con cariche dello stesso segno?

**Esperimento 7.23**

Ripetiamo l'Esperimento 6.5 (Figura 6.7). Ma ora la cannuccia negativa venga posta ancora più vicino alla striscia dell'elettroscopio carico negativamente. Osserviamo che per distanze minori o uguali a un determinato valore, diciamo da 2 fino a 4 cm, la striscia non viene più respinta dalla cannuccia, ma ne viene attratta. Essa tocca, quindi, la cannuccia e rimane attaccata ad essa.

**Esperimento 7.24**

Ripetiamo gli Esperimenti 4.7 e 5.23 (Figure 4.18 e 5.27). Ma ora la cannuccia negativa venga avvicinata ancora di più al disco negativo del pendolo. Osserviamo che l'inclinazione del pendolo rispetto alla verticale aumenta quando la loro distanza passa da 15 a 5 cm, approssimativamente. Ciò dimostra che l'intensità della forza repulsiva aumenta quando la distanza tra tali oggetti diminuisce di circa 10 cm.

Tuttavia, per distanze inferiori o uguali a un certo valore, dell'ordine di 5 cm, non c'è più repulsione tra la cannuccia negativa e il disco negativo. A queste distanze così piccole essi si attraggono. Il disco tocca la cannuccia negativa una seconda volta e viene nuovamente respinto da essa.

Dopo 2 o 3 di tali contatti tra la cannuccia negativa e il disco del pendolo, vengono osservati gli stessi fenomeni ancora una volta, ma a distanze diverse. Quando il disco ha un maggior grado di elettrizzazione, la repulsione tra esso e la cannuccia negativa può essere osservata a una distanza più grande di prima, all'incirca 20 cm. L'intensità della forza di repulsione aumenta quando questa distanza scende da 20 cm al limite inferiore di 2 o 3 cm. Quando poi la distanza tra la cannuccia e il disco ha un valore minore o uguale di tale limite, vi è di nuovo una reciproca attrazione ed entra in gioco il meccanismo ACR.

Questi esperimenti possono essere compresi sulla base delle leggi finora scoperte.

Supponiamo che un corpo *I*, un isolante, sia stato caricato negativamente per strofinio. Esso si trova vicino a un corpo neutro *II*, un conduttore, non carico. Ci sarà una forza di attrazione tra di loro. Questa forza di attrazione è dovuta alla polarizzazione del corpo *II* in presenza del corpo *I*, come in Figura 7.29. Rappresentiamo la loro forza di attrazione tramite $F_A > 0$ (Figura 7.32 (a)). Ora elettrizziamo il corpo *II* con una carica dello stesso segno della carica del corpo attraente *I*. Questo può essere fatto, per esempio, attraverso il meccanismo ACR. Ciò genererà una nuova forza tra di loro. Essa è repulsiva e sarà qui rappresentata da $F_R < 0$. In Figura 7.32 (b) mostriamo questa nuova forza di repulsione, senza tener conto della precedente forza attrattiva dovuta alla polarizzazione del conduttore. La nuova carica negativa sul conduttore è rappresentata nel mezzo del corpo *II* solo allo scopo di distinguerla dalle cariche polarizzate. Questa nuova carica sul corpo *II* tenderà a polarizzare il corpo *I*, generando una forza di attrazione tra di loro, ma non terremo conto di questa piccola componente al momento. In ogni caso, l'attrazione che si era verificata precedentemente tra i due rimarrà ancora. La forza complessiva sarà data approssimativamente da $F_N = F_A + F_R$. Se $F_A > |F_R|$, la forza risultante sarà attrattiva. Se $F_A < |F_R|$, la forza risultante sarà repulsiva. Nella Figura 7.32 (c) mostriamo un esempio per il quale $F_A < |F_R|$.

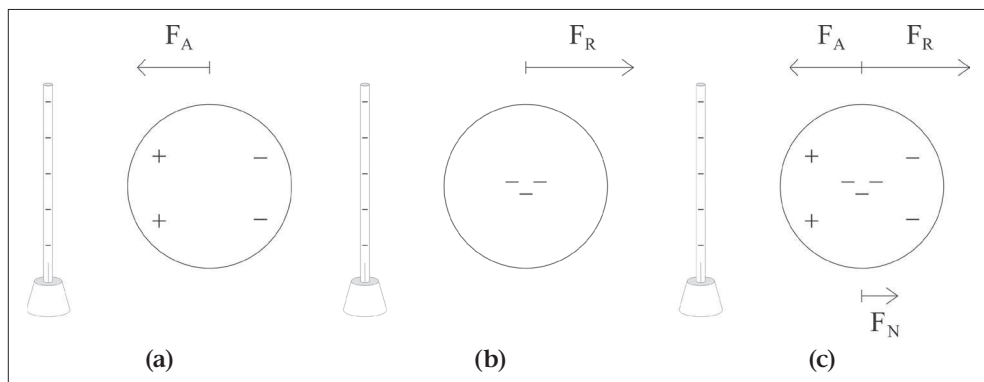



Figura 7.32. **(a)** Forza attrattiva causata dalla polarizzazione di un conduttore neutro nelle vicinanze di un isolante elettrizzato. **(b)** Forza repulsiva ideale tra un isolante negativo ed un conduttore negativo, supponendo che il conduttore non sia polarizzato dalla cannuccia negativa. **(c)** Forza risultante $F_N = F_A + F_R$ tra un isolante elettrizzato e un conduttore, supponendo che il conduttore sia elettrizzato e polarizzato. Situazione per la quale $F_A < |F_R|$.

Da quello che abbiamo visto fino ad ora, potremmo dare tre condizioni perché, tra questi due corpi elettrizzati con cariche dello stesso segno, si ottenga una forza attrattiva complessiva.

- La forza di attrazione, in origine, è indipendente dal valore della nuova carica data al corpo *II*, inizialmente neutro, mentre la successiva forza di repulsione dipende dal valore di questa nuova carica. Se quest'ultima è molto grande, $|F_R|$ sarà generalmente maggiore di $F_A$ (Figura 7.33 (a)). Diminuendo la quantità di questa nuova carica sul corpo *II*, si può ridurre l'entità di detta forza repulsiva in modo tale che, nonostante i due corpi abbiano una carica complessiva dello stesso segno, (Figura 7.33 (b)) risulti tra essi un'attrazione.

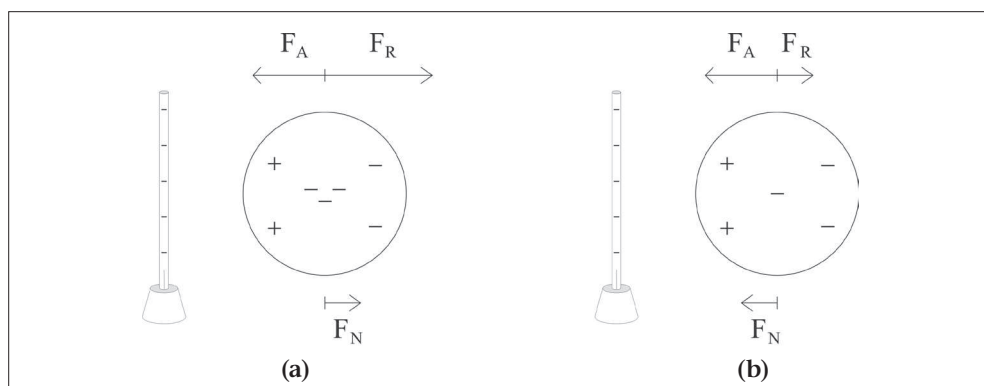



Figura 7.33. **(a)** Quando la carica totale del conduttore è grande, una forza repulsiva si produrrà tra esso e l'isolante negativo. **(b)** Quando il conduttore ha invece solo una piccola carica, la forza di attrazione dovuta alla sua polarizzazione sarà maggiore della forza repulsiva dovuta alla sua carica totale, producendo in definitva una forza attrattiva.

- Supponiamo che conduttore ed isolante siano entrambi negativi e che $|F_R| > F_A$, in modo tale che tra loro vi sia repulsione (Figura 7.34 (a)). Allorché aumentiamo la quantità di carica sull'isolante, aumentiamo l'intensità della forza repulsiva $|F_R|$. Anche l'intensità della forza attrattiva $F_A$ aumenta, ma lo fa più velocemente rispetto

all'aumento di $|F_R|$. Il motivo è che stiamo anche aumentando il numero di cariche polarizzate sul conduttore, come visto nella Sezione 7.3 (Figura 7.10). Ad esempio, se la carica dell'isolante aumenta tre volte, $|F_R|$ aumenta anche di circa tre volte. Invece, $F_A$ aumenta di circa nove volte. Se si accresce continuamente la quantità di carica sull'isolante, ci sarà un momento in cui $F_A$ sarà più grande di$|F_R|$, producendo come conseguenza tra loro una forza attrattiva (Figura 7.34 (b)).

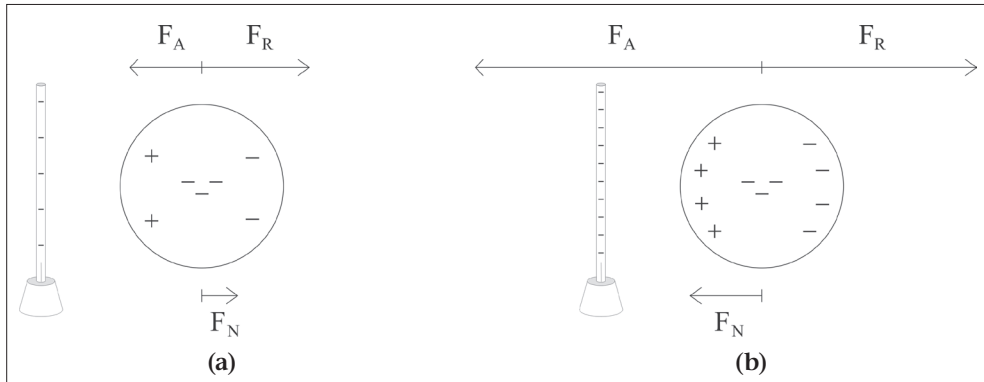



Figura 7.34. **(a)** Forza repulsiva più grande della forza di attrazione. **(b)** $F_A$ aumenta più di $|F_R|$ a causa di un aumento della quantità di carica nell'isolante vicino. Qui mostriamo una situazione nella quale la forza di attrazione è diventata maggiore della forza repulsiva.

- C'è anche un'altra situazione che può produrre una forza complessivamente attrattiva tra due corpi con cariche dello stesso segno. Supponiamo che il conduttore e l'isolante siano entrambi negativi e che $|F_R| > F_A$, in modo tale che vi sia una repulsione tra loro quando sono separati da una distanza *d* (figura 7.35 (a)). Le intensità di queste due forze di attrazione e repulsione si comportano in modo diverso a seconda della distanza tra i due corpi. Diminuendo la loro distanza, aumentiamo l'intensità di $F_R$ dovuta solo all'avvicinamento tra la carica negativa di *I* e la carica totale negativa di *II*. La forza di attrazione $F_A$, invece, aumenta per due diversi motivi. (a) Il primo è dovuto alla distanza ridotta tra la carica negativa di *I* e le cariche polarizzate di *II*. (b) La seconda ragione è che anche il numero di cariche polarizzate di *II* aumenta quando la distanza tra *I* e *II* diminuisce, come visto nella Sezione 7.3 (Figura 7.8). Siccome la forza dipende non solo dalla distanza ma anche dal numero di cariche nei corpi, questa polarizzazione più intensa produrrà, di conseguenza, una maggiore forza di attrazione. Ciò significa che se i corpi *I* e *II* sono molto vicini l'uno all'altro, può risultare un'attrazione tra di loro anche se entrambi hanno una carica dello stesso segno (Figura 7.35 (b)).

Il segno della forza risultante (attrattiva o repulsiva) dipenderà dai valori delle due cariche, dalla distanza tra i corpi, dalle loro forme, dalle loro dimensioni e dalle loro proprietà intrinseche (cioè, se sono conduttori o isolanti, in quanto questo influenzerà il loro grado di polarizzazione).

Lo stesso Du Fay sapeva che in determinate circostanze due corpi elettrizzati con cariche dello stesso segno potevano attrarsi l'un l'altro[9]:

> Per avere successo in questi esperimenti [di attrazione tra corpi di carica opposta, e repulsione tra corpi elettrizzati aventi cariche dello stesso tipo], è richiesto che i due corpi, che sono messi uno vicino all'altro al fine di scoprire la natura della loro elettricità, siano resi il più possibile elettrici; poiché se uno di essi non lo fosse affatto, o se

fosse debolmente elettrico, sarebbe attratto dall'altro, anche se esso fosse dello stesso genere, tale che [se ben strofinato] avrebbe dovuto naturalmente essere respinto da esso. Ma l'esperimento riuscirà sempre perfettamente, se entrambi i corpi sono sufficientemente elettrici.

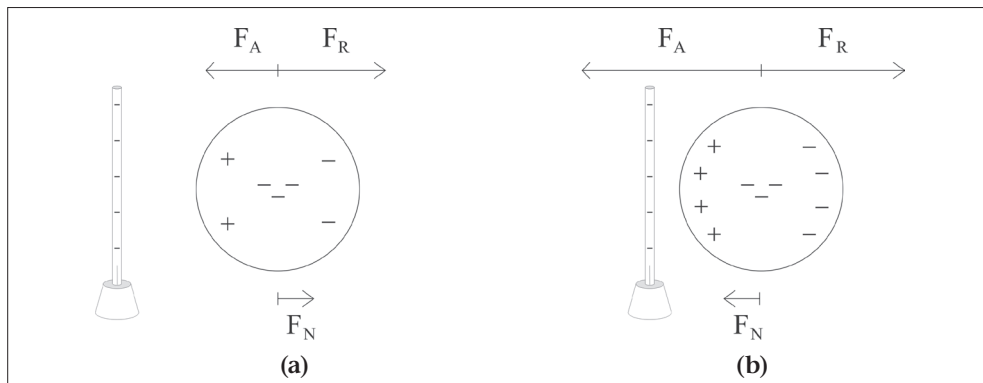



Figura 7.35. (**a**) La forza repulsiva $|F_R|$ è più grande della forza di attrazione $F_A$. (**b**) Quando la distanza tra i due corpi diminuisce, $F_A$ aumenta più di $|F_R|$. Alla breve distanza mostrata in figura, la forza di attrazione diventa maggiore della forza repulsiva.

Epino tentò per primo di dare una spiegazione matematica alle possibili attrazioni tra due corpi che trasportano cariche dello stesso segno. Egli mostrò sia teoricamente che sperimentalmente che se due corpi elettrizzati con cariche dello stesso segno sono sufficientemente vicini, o se una delle due cariche coinvolte è molto più debole rispetto all'altra, gli effetti di mutua polarizzazione possono essere sufficienti a modificare la forza repulsiva normale in un'attrazione[10].

Non entreremo nei dettagli qui, ma una moderna analisi matematica indicante le condizioni per cui corpi elettrizzati, aventi cariche dello stesso segno, possono attrarsi l'un l'altro, si può trovare, ad esempio, nel lavoro di Maxwell, in un articolo di Melehy, e nel libro di Jackson[11].

## 7.11 La conducibilità dell'acqua

Nella Sezione 6.3 abbiamo visto che l'acqua dolce scarica un elettroscopio elettrizzato. Ciò significa che essa si comporta come conduttore per gli esperimenti elettrostatici comuni descritti in questo libro. Al contrario, quando essa è sottoposta ad una differenza di potenziale che va da pochi volt ad alcune centinaia di volt, essa si comporta come isolante, nel modo in cui si è visto nella Sezione 6.6. Negli esperimenti di Sezione 2.5 avevamo a che fare con una differenza di potenziale di qualche migliaio di volt, per cui l'acqua si comportava come conduttore. Ci sono delle ragioni per questo comportamento dell'acqua. Una ragione è che nel suo stato naturale l'acqua dolce contiene ioni positivi, $H_3O^+$ e ioni negativi, $OH^-$, oltre a molecole di $H_2O$. Inoltre, l'acqua dolce contiene molti sali, minerali e impurità che abbondano di particelle elettricamente cariche, chiamate anche ioni. In presenza di elevate differenze di potenziale, questi ioni elettrizzati si muovono in acqua, conferendole il suo comportamento conduttivo.

Analizziamo ora gli esperimenti della Sezione 2.5. Supponiamo che la goccia d'acqua dell'esperimento di Gilbert, l'Esperimento 2.10, sia su una superficie conduttrice, quale legno, metalli o la maggior parte dei solidi. Quando avviciniamo ad essa una cannuccia di plastica strofinata, la goccia cambia forma. Essa cioè si deforma puntando verso la parte della cannuccia che è stata strofinata. Se l'attrito tra l'acqua e la superficie su cui è appoggiata è basso, la goccia può anche muoversi tutta insieme verso la cannuccia. Con i

risultati visti nel presente Capitolo, è possibile illustrare ciò che sta avvenendo in questo esperimento. Ciò vien fatto in Figura 7.36. Supponiamo che la cannuccia sia stata strofinata tra i capelli, acquisendo una carica negativa. Quando poi essa viene avvicinata alla goccia, l'acqua inizialmente si polarizza nel suo complesso, analogamente a quanto visto nella Figura 7.29. Ciò significa che essa si carica positivamente nella regione più vicina alla cannuccia strofinata e negativamente nella regione più lontana, che è in contatto con la superficie asciutta. Siccome abbiamo ipotizzato che la superficie solida sia conduttrice, c'è una neutralizzazione elettrica in corrispondenza della parte della goccia che è in contatto con essa. Questo è analogo alla messa a terra nelle Figure 7.20, 7.22 e 7.30. Di conseguenza, l'acqua finisce per diventare interamente elettrizzata, con carica positiva, opposta di segno alle cariche sulla cannuccia. Poiché le cariche di segno opposto si attraggono tra di loro, la goccia si deforma e punta verso la cannuccia strofinata. Essa può anche muoversi tutta insieme in direzione della cannuccia.

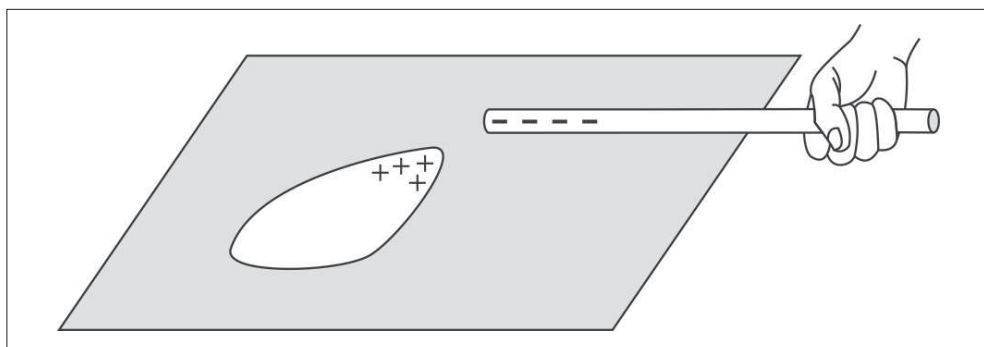



Figura 7.36. Cariche elettriche su una goccia d'acqua vicino ad una cannuccia di plastica strofinata.

Riteniamo che questo comportamento della goccia d'acqua non sia dovuto semplicemente ad un orientamento od organizzazione delle molecole polarizzate d'acqua (sebbene, nell'insieme, la molecola $H_2O$ sia neutra, essa è polarizzata per sua natura, come dipolo elettrico permanente). Se ci fosse solo l'organizzazione o allineamento polare delle molecole in acqua, a causa della presenza della cannuccia strofinata nelle vicinanze, avremmo qualcosa di analogo alla Figura 7.31 (a). Invece, sembra più ragionevole affermare che la goccia d'acqua nel suo complesso, essendo posta su una superficie conduttrice e vicina ad una cannuccia strofinata, abbia acquisito una carica. Inoltre, questa carica sulla goccia sarà di segno opposto rispetto alla cannuccia strofinata, come illustrato in Figura 7.30 (c).

Qualcosa di analogo accade nell'esperimento di Desaguliers (Esperimento 2.8). Abbiamo un flusso d'acqua dolce che corre da un rubinetto. A causa delle differenze di potenziale elevate di questo esperimento, quest'acqua si comporta come un conduttore. Inoltre, supponendo che si tratti di un flusso continuo, l'acqua è messa a terra nel contatto con il rubinetto di metallo, il quale a sua volta è in contatto con il suolo. Supponiamo di portare una cannuccia di plastica con carica negativa nei pressi del rivolo d'acqua. Questo è inizialmente polarizzato (a causa del moto e della separazione degli ioni presenti in acqua, come $H_3O$ +, OH-, ecc.), analogamente alla Figura 7.29. La parte del flusso più vicina alla cannuccia negativa diventa positivamente carica. Al contrario, le cariche negative nella parte più lontana del flusso sono neutralizzate a causa della messa a terra dell'acqua. Ciò è analogo alla messa a terra delle Figure 7.20, 7.22 e 7.30. Per questo motivo, il flusso nel suo complesso deve diventare positivamente carico, soprattutto nella parte più vicina alla cannuccia negativa. Vi è allora un'attrazione tra le cariche negative della cannuccia e le

cariche positive dell’acqua. Di conseguenza, il flusso nel suo complesso si piega verso la cannuccia. La Figura 7.37 illustra la distribuzione delle cariche lungo il flusso di acqua.

Figura 7.37. Cariche elettriche su un flusso d’acqua nei pressi di una cannuccia di plastica strofinata.

## 7.12 È possibile elettrizzare l’acqua?

L’acqua si comporta come un conduttore negli esperimenti comuni di elettrostatica. Perciò, è possibile elettrizzarla come si fa di solito con i conduttori solidi. Per fare questo, essa dev’essere tenuta in un recipiente isolante. In questo modo possiamo impedire la sua scarica a terra.

Come discusso nella Sezione 7.11, nell’esperimento di Gilbert una piccola quantità di acqua veniva attratta verso l’ambra strofinata. Probabilmente l’acqua nel suo complesso era elettrizzata in questa situazione. Ma Gilbert non si chiese se l’acqua fosse stata elettrizzata in questo caso, egli si limitò ad osservarne l’attrazione. Forse Gray nel 1731 fu il primo ad elettrizzare l’acqua e a darne conferma[12]. Egli mise l’acqua su un supporto isolante di resina o di vetro. Avvicinò quindi all’acqua per 3 o 4 volte un tubo elettrizzato e poi lo mise da parte. Da un filo pendulo messo in prossimità dell’acqua, egli intanto si rese conto di un’attrazione a causa di questa. Ciò provò che l’acqua veniva elettrizzata dal tubo, quando il tubo era ad essa avvicinato. Il meccanismo di carica in questo caso consistette probabilmente in piccole scintille tra il tubo e l’acqua. Ciò causò un trasferimento di carica dal tubo all’acqua conduttrice. L’acqua poté immagazzinare la carica acquisita grazie al fatto che essa era tenuta su un supporto isolante. Questo esperimento fu successivamente confermato da Du Fay[13].

Con opportuni adattamenti, è possibile riprodurre molti esperimenti del Capitolo 7 utilizzando dell’acqua in un recipiente di plastica, invece di un cartoncino attaccato ad una cannuccia di plastica. Il comportamento conduttore del cartoncino sarà assunto dall’acqua. Il recipiente di plastica eviterà che la l’acqua venga messa a terra elettricamente, proprio come la cannuccia di plastica veniva impiegata per isolare il cartone dell’elettroscopio.

### 7.12.1 Il generatore elettrostatico di Kelvin

Uno degli esperimenti più affascinanti che mostrano che l’acqua si comporta come un conduttore nelle situazioni comuni dell’elettrostatica è stato condotto nel 1867 da W. Thomson (Lord Kelvin) (Figura 7.38).

Egli costruì uno strumento che è conosciuto come “water dropper” (gocciolatore d’acqua), macchina elettrica a gocciolamento d’acqua, generatore a gocciolamento d’acqua o generatore elettrostatico di Kelvin[14]. Descriviamo qui gli aspetti principali del generatore. Inizialmente l’acqua è posta in un contenitore isolante, come una tazza di plastica. Nella parte inferiore di questa tazza c’è un foro o gocciolatore. All’inizio dell’esperimento, esso resta chiuso. Colleghiamo un anello metallico alla tazza tramite un materiale isolante. L’anello deve essere posto molto vicino al foro o al gocciolatore, ad una distanza di pochi centimetri da esso. Strofiniamo una cannuccia di plastica tra i capelli per caricarla ne-

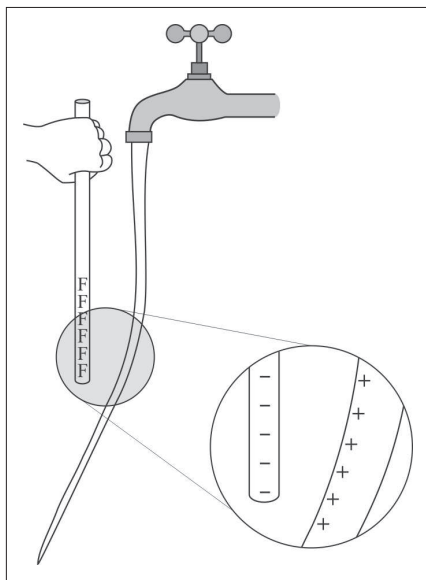
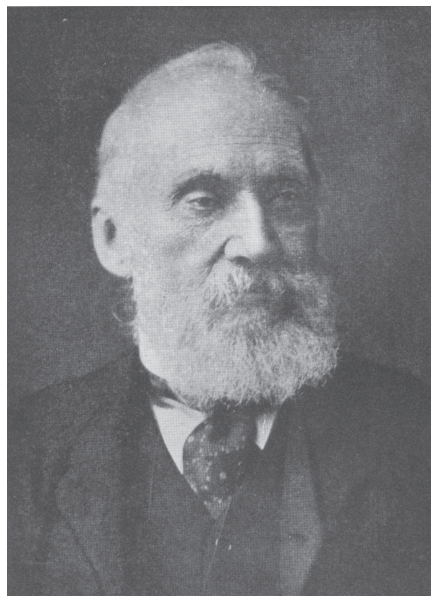



Figura 7.38. W. Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907).

gativamente. La cannuccia negativa viene poi strisciata sopra l'anello di metallo per caricarlo negativamente. Dopodiché, la cannuccia di plastica viene allontanata dall'anello. Poiché l'acqua si comporta come conduttore, essa diviene polarizzata a causa della presenza dell'anello negativo posto appena sotto di essa. La porzione inferiore dell'acqua si carica positivamente, mentre la porzione superiore che è a contatto con l'aria diventa negativa (Figura 7.39 (a)). Tutto questo è analogo alla polarizzazione descritta in Figura 7.29.

Dopo aver caricato negativamente l'anello, si apre il foro o gocciolatore. Le gocce d'acqua devono passare attraverso il centro dell'anello, senza entrare in contatto con esso. La porzione inferiore dell'acqua presente nel recipiente superiore è positivamente carica. Lo stesso vale pertanto per le goccioline. Queste goccioline positive vengono raccolte in un secondo recipiente isolante posto sotto l'anello (Figura 7.39 (b)). Mentre le goccioline d'acqua continuano a cadere, la quantità di cariche accumulate nel recipiente inferiore aumenta. Detta Figura mostra i principali aspetti del meccanismo di funzionamento del generatore di Kelvin.

Normalmente il generatore di Kelvin presenta due gocciolatori. Uno degli anelli è elettrizzato positivamente e l'altro anello è elettrizzato negativamente (Figura 7.40). Un filo metallico con una sfera di metallo nella sua estremità superiore è collegato alla parte interna di ogni recipiente inferiore. Le due sfere di metallo devono essere molto vicine l'una all'altra, con una distanza tipica di pochi millimetri. Le gocce d'acqua che cadono attraverso l'anello negativo sono cariche positivamente, mentre quelle che cadono attraverso l'anello positivo sono cariche negativamente.

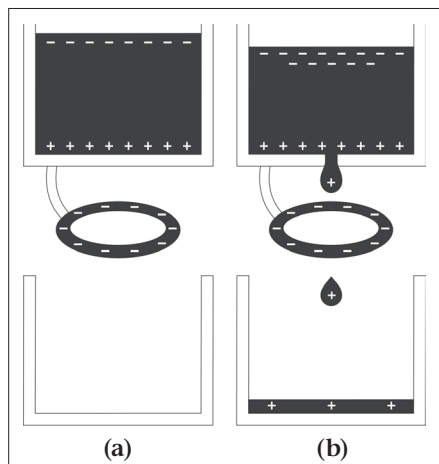



Figura 7.39. **(a)** Polarizzazione dell'acqua dovuta all'anello negativo vicino. **(b)** Le gocce d'acqua cadono elettrizzate con carica positiva.

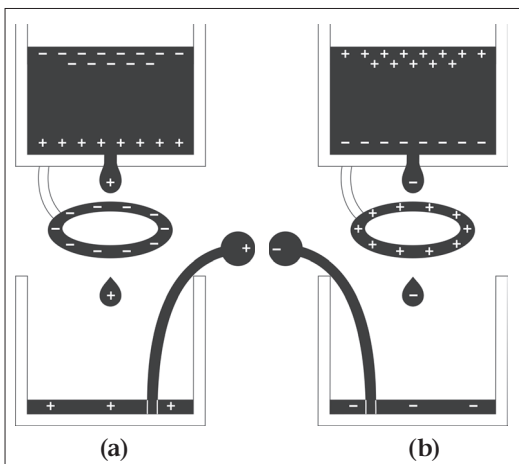



Figura 7.40. Prima fase del processo operativo del generatore di Kelvin.

Col passare del tempo, la quantità di cariche accumulate in ogni recipiente inferiore aumenta. Pertanto, anche la differenza di potenziale fra le due sfere di metallo aumenta. L'aria secca è normalmente un buon isolante, soprattutto se in presenza di una forza elettrica per unità di carica al di sotto un certo limite. Quando la forza per unità di carica è superiore a questo limite, essa diventa un conduttore ed una scarica elettrica, una scintilla, si verifica attraverso l'aria. Questo limite è chiamato campo elettrico di rottura o effetto corona. A pressione atmosferica esso vale circa $3 \times 10^6$ V/m. Quando la forza elettrica per unità di carica nella regione tra le due sfere va oltre questo limite, vi è una scarica elettrica attraverso l'aria (Figura 7.41).

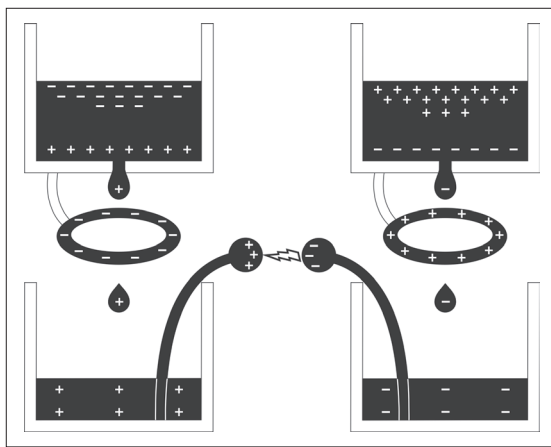



Figura 7.41. Scarica elettrica tra le sfere di carica opposta.

Con questa scarica, le cariche opposte che si sono accumulate nei recipienti inferiori si neutralizzano. Se il gocciolamento continua dopo la scintilla, il processo va avanti come nelle Figure 7.40 e 7.41. L'intervallo di tempo tra due scintille consecutive dipenderà dalla frequenza di gocciolamento, dalla distanza tra le sfere di metallo, dalla quantità di carica negli anelli e dalla distanza tra gli anelli e i gocciolatori. Un tipico ordine di grandezza è una scintilla ogni 10 secondi. Le scintille continueranno finché il gocciolamento continua.

In questo esperimento si vedono due cose importanti. La prima è che l'acqua si comporta come un conduttore negli esperimenti comuni di elettrostatica, come abbiamo visto nelle Sezioni 6.3 e 7.11. La seconda è che se c'è un corpo elettrizzato vicino al punto in cui l'acqua gocciola, le goccioline d'acqua diventano elettricamente cariche, con una carica risultante di segno opposto rispetto alla carica del corpo elettrizzato vicino.

## 7.13 La conducibilità dell'aria

### Esperimento 7.25

È facile elettrizzare un elettroscopio in un giorno asciutto. Abbiamo solo bisogno di strofinare una cannuccia di plastica tra i capelli e poi strisciare questa cannuccia sul cartoncino dell'elettroscopio, come abbiamo visto nell'Esperimento 6.2 (Figura 6.5). L'elettroscopio rimane carico per alcuni secondi o per alcuni minuti dopo questa procedura. Questo significa che l'aria secca è un buon isolante.

Tuttavia, essa non è un isolante perfetto. Dopo alcuni minuti l'elettroscopio è completamente scarico, come abbiamo visto nell'Esperimento 6.21. In ogni caso, può essere considerata un buon isolante, secondo la definizione data nella Sottosezione 6.7.1.

**Esperimento 7.26**

L'Esperimento 7.25 è ripetuto in una giornata umida e piovosa. La striscia dell'elettroscopio rimane sollevata mentre noi strisciamo la cannuccia strofinata sul cartoncino dell'elettroscopio, come nella Figura 6.5 (b).

Successivamente, allontaniamo la cannuccia strofinata. La striscia cade poco dopo, ritornando alla situazione di Figura 6.5 (a). Maggiore è l'umidità dell'aria, più veloce sarà la scarica dell'elettroscopio. A seconda del valore di tale umidità, l'aria può comportarsi come un buono o un cattivo conduttore. È la presenza di acqua nell'aria umida che la fa comportare come un conduttore, a causa del fatto che l'acqua è un buon conduttore negli esperimenti comuni di elettrostatica, come discusso nella Sezione 7.11.

**Esperimento 7.27**

C'è un'altra procedura semplice che può influenzare la proprietà isolante dell'aria. Ripetiamo gli Esperimenti 6.2 e 7.25 in un giorno asciutto. L'elettroscopio è inizialmente elettrizzato. La striscia rimane sollevata, come in Figura 7.42 (a).

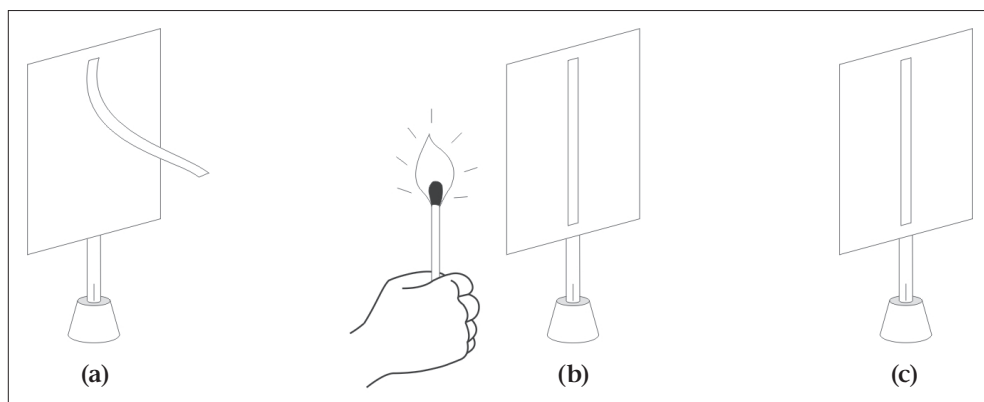



Figura 7.42. **(a)** Elettroscopio elettrizzato. **(b)** La striscia scende in pochi secondi se si accende un fiammifero o un accendino nelle sue vicinanze. **(c)** La striscia rimane verticale dopo aver rimosso il fiammifero.

Accendiamo un fiammifero o un accendino in prossimità dell'elettroscopio elettrizzato. La striscia cade in pochi secondi (Figura 7.42 (b)). La striscia non si solleva dopo aver rimosso il fiammifero (Figura 7.42 (c)).

Questo esperimento dimostra che l'elettroscopio si scarica molto rapidamente quando c'è un fuoco nelle sue vicinanze.

L'interpretazione moderna di questo fenomeno è che la fiamma aumenta enormemente la ionizzazione dell'aria. Con l'aumento del numero di cariche mobili positive e negative in aria, le cariche sull'elettroscopio sono rapidamente neutralizzate da questi ioni. Con l'aumento della conducibilità dell'aria, l'elettroscopio viene scaricato anche attraverso la mano e la terra. Il fuoco fa in modo che l'aria si comporti come un buon conduttore.

## 7.14 Come scaricare un isolante elettrizzato?

La messa a terra è il modo più semplice per scaricare un conduttore elettrizzato, come abbiamo visto nelle Sezioni 4.5, 6.2, e 6.3. Per fare questo, il conduttore ha bisogno solo di entrare in contatto con il terreno. Un'altra possibilità consiste nel collegare il conduttore elettrizzato con la terra tramite un materiale conduttore (come il corpo umano o un filo di metallo).

Non possiamo invece scaricare un isolante elettrizzato attraverso questa procedura. Questo è evidente nel primo esperimento che ha dato origine alla scienza dell'elettricità, l'effetto ambra, Sezioni 2.1 e 2.2. Nella Figura 2.3 abbiamo una cannuccia strofinata che attira piccoli pezzi di carta. La cannuccia di plastica è tenuta in mano mentre attira i pezzi di carta. Nonostante ciò, essa non si è scaricata. Questa è una delle principali distinzioni tra conduttori e isolanti, come discusso nella Sezione 7.1.

### Esperimento 7.28

Una cannuccia di plastica viene sfregata tra i capelli. Dopodiché la cannuccia attira pezzi di carta, come nell'Esperimento 2.1. Proviamo in seguito a mettere a terra la cannuccia. Per fare questo, colleghiamo un filo metallico fra il terreno e una delle parti strofinate della cannuccia. Dopo questa procedura, il filo metallico viene messo via. Passiamo ancora una volta la cannuccia vicino ai piccoli pezzi di carta. Osserviamo che la cannuccia attrae ancora questi pezzi di carta.

Quello che succede in questo esperimento è semplice da descrivere. Solo il punto specifico della cannuccia di plastica che è entrato in contatto con il filo metallico è stato scaricato a terra. Vale a dire che le altre parti sfregate della cannuccia non si sono scaricate attraverso questa messa a terra elettrica. Dopo tutto, queste cariche non possono muoversi attraverso la cannuccia a causa del fatto che la plastica è un ottimo isolante.

Nel prossimo esperimento vedremo tre procedure utilizzate per scaricare un isolante elettrizzato.

### Esperimento 7.29

Tre cannucce di plastica sono sfregate nei capelli allo stesso modo. Chiamiamole cannucce *I*, *II*, e *III*. Dopo essere state caricate, le cannucce *II* e *III* sono tenute verticalmente su appositi supporti separati, come quelli del pendolo elettrico. Per esempio, esse possono essere sistemate su graffette opportune, quelle che ad esempio vengono fissate ad una tazza di caffè di plastica riempita con della pasta di gesso o cemento bianco (Figura 7.43). Con la cannuccia *I* ripetiamo l'Esperimento 2.1 e la osserviamo attirare piccoli pezzi di carta quando la portiamo vicina ad essi.

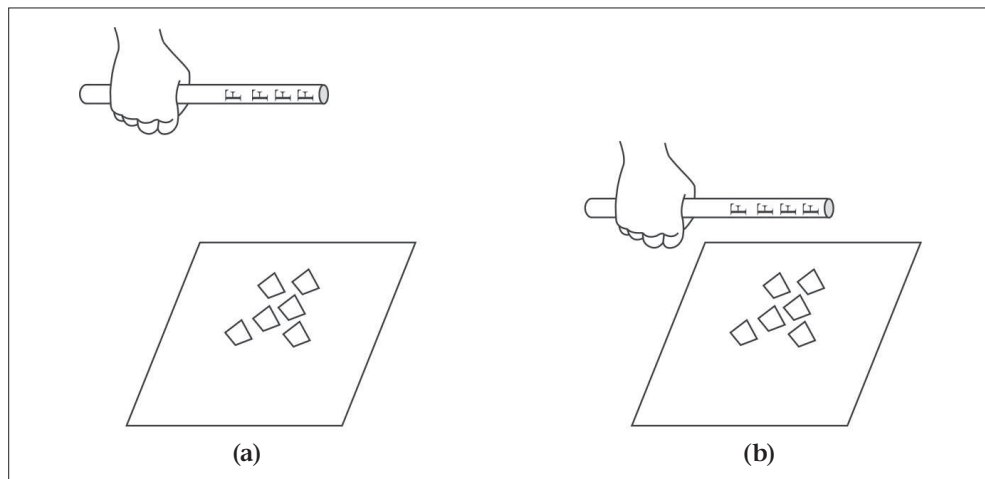



Figura 7.43. Una cannuccia strofinata perde la sua elettrizzazione diverse ore dopo lo sfregamento iniziale. Essa non attira più piccoli pezzi di carta quando viene portata vicino ad essi.

Dopo alcuni minuti o poche ore, questo esperimento viene ripetuto con la cannuccia *II*, che ha ricevuto solo lo sfregamento iniziale insieme con le cannucce *I* e *III*. Normalmente essa attirerà un numero molto piccolo di pezzi di carta, chiaramente inferiore al numero attratto dalla cannuccia *I*. Il numero di pezzi di carta dipenderà dal periodo di attesa dopo lo sfregamento iniziale, dal tipo di sfregamento, dalla qualità della plastica e dalle condizioni meteorologiche locali (cioè se è una giornata secca o umida).

Il giorno successivo, questo esperimento viene ripetuto con cannuccia *III,* con la quale intanto non è stata compiuta nessuna operazione dopo lo sfregamento iniziale. Osserviamo che essa non attira più i piccoli pezzi di carta (Figura 7.43).

Il simbolo *F* in Figura 7.43 indica soltanto che la cannuccia è stata sfregata diverse ore prima. Nient'altro è stato fatto con questa cannuccia. Nonostante questo sfregamento, essa perde la sua elettrizzazione dopo un lungo periodo di attesa. Perde, cioè, la sua capacità di attrarre piccoli pezzi di carta quando viene portata vicino ad essi. Dalla definizione della Sezione 2.1, ciò significa che la cannuccia è diventata di nuovo elettricamente neutra, come prima dello sfregamento. Essa ha quindi perso la sua elettrizzazione o le cariche che aveva acquisito durante la procedura di sfregamento. Queste cariche sono state cedute all'aria circostante. Sebbene l'aria secca sia un buon isolante, essa non è un isolante perfetto, come discusso nella Sottosezione 6.7.1.

### Esperimento 7.30

Presentiamo ora la seconda procedura per scaricare un isolante elettrizzato.

Inizialmente strofiniamo tra i capelli una cannuccia di plastica. Essa attrae pezzi di carta, come nell'Esperimento 2.1. Dopo questa prova, la cannuccia di plastica viene immersa in un recipiente pieno di acqua dolce. La cannuccia viene quindi estratta dall'acqua. Portiamo ancora una volta la cannuccia vicino ai pezzi di carta. Questa volta non li attira più, lo si vede nella Figura 7.43. Come negli altri esperimenti, dobbiamo solo portare la cannuccia vicino ai pezzi di carta, evitando che vengano a contatto. Se ciò accadesse, dei pezzi di carta potrebbero attaccarsi alla cannuccia a causa della sua umidità. Possiamo anche dare alcuni colpi sulla cannuccia dopo che è stato rimossa dall'acqua, o soffiare leggermente su di essa, per eliminare il residuo di acqua sulla sua superficie.

Questo esperimento indica che la cannuccia strofinata perde il suo potere attrattivo dopo essere immersa in acqua. Ciò significa che l'acqua neutralizza la cannuccia. Questa neutralizzazione è di nuovo dovuta al potere di conduzione dell'acqua dolce. Quando l'acqua entra in contatto intimo con tutte le parti strofinate della cannuccia di plastica che sono state elettrizzate per sfregamento, neutralizza le cariche superficiali a causa del gran numero dei suoi ioni positivi e negativi mobili. La differenza rispetto all'Esperimento 7.28 è che ora abbiamo una messa a terra di tutte le parti elettrizzate della cannuccia strofinata, che quindi vengono neutralizzate contemporaneamente.

### Esperimento 7.31

Anche la terza procedura per scaricare un isolante elettrizzato è molto semplice. Inizialmente si carica una cannuccia di plastica sfregandola tra i capelli. Essa dunque attira pezzi di carta, come nell'Esperimento 2.1. Mettiamo la cannuccia strofinata lontano dal tavolo. Dopo di ciò, accendiamo un fiammifero o un accendino nelle vicinanze della cannuccia. La fiamma deve essere fatta passare vicino a tutte le parti della cannuccia strofinata, come in Figura 7.44.

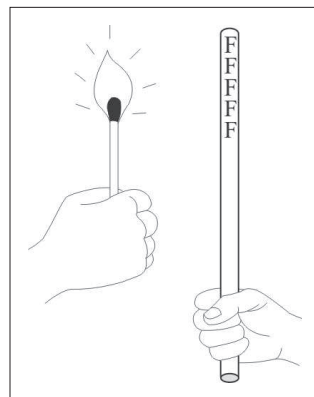



Figura 7.44. Accendiamo un fiammifero vicino ad una cannuccia strofinata.

Dopo questa procedura, la cannuccia viene riportata vicino ai pezzi di carta. Questa volta non li attira più, come in Figura 7.43. La cannuccia è stata così scaricata.

Come abbiamo visto nella Sezione 2.6, Gilbert fu il primo a descrivere il fenomeno. Egli osservò che una fiamma impediva le comuni attrazioni esercitate dai materiali strofinati. Invece di osservare l'attrazione o la mancanza di attrazione esercitata su pezzi di carta, egli studiava se l'ambra strofinata era in grado di orientare un versorium vicino. Come ebbe modo di dire, "[gli elettrici strofinati] non hanno alcun effetto su un versorium se è molto prossima, su qualsiasi lato, la fiamma di una lampada". Egli interpretò questo fatto supponendo che la fiamma consumava i presunti effluvi emessi dai materiali strofinati. Egli credeva che i comuni effetti di attrazione esibiti dall'ambra strofinata fossero dovuti all'azione di tali effluvi.

Oggi abbiamo un'altra l'interpretazione di questo fenomeno. Quello che è successo in questo caso è analogo alla situazione descritta nell'Esperimento 7.27. Cioè, la fiamma aumenta enormemente la ionizzazione delle molecole d'aria. Pertanto, l'aria inizia a comportarsi come un buon conduttore, avendo ora un gran numero di ioni mobili positivi e negativi. Il contatto intimo tra l'aria ionizzata e tutte le parti della cannuccia strofinata neutralizza le cariche situate su tutta la superficie della plastica. In questo modo la cannuccia perde le cariche che aveva acquisito per strofinio. Pertanto, essa non attrae più i piccoli pezzi di carta.

## 7.15 Un piccolo pezzo di carta è attratto con una forza maggiore quando sta sopra un isolante o un conduttore?

### Esperimento 7.32

Scegliamo un sacchetto di plastica che si comporta come isolante, cioè, che non scarica un elettroscopio elettrizzato quando i due si toccano. Tagliamo diversi pezzi di questo sacchetto di plastica e diversi pezzi di un foglio di carta. Creiamo poi due superfici: una isolante, costituita da un pannello di polistirolo, ed una conduttrice, costituita da un foglio di carta (o una tavoletta o una piastra di metallo).

Un gruppo di pezzi di plastica, gruppo *I*, è posto sul pannello di polistirolo. Sullo stesso pannello inoltre poniamo un gruppo di pezzi di carta, gruppo *II*, separato dal primo gruppo. Sulla superficie conduttrice è collocato un altro gruppo di pezzi di plastica, gruppo *III*. Sulla stessa superficie conduttrice, ma separato dal terzo gruppo, poniamo un gruppo di pezzi di carta, gruppo *IV*.

Prima di iniziare l'esperimento, è importante verificare che i pezzettini di plastica sul pannello di polistirolo e sul foglio di carta siano davvero neutri. Talvolta essi si elettrizzano mentre li manipoliamo, li tagliamo, ecc. Per verificare questa neutralità di carica, portiamo una cannuccia di plastica neutra vicino ad essi. Se non c'è attrazione, i pezzi di plastica possono essere considerati neutri. Quando essi sono attratti dalla cannuccia neutra, significa invece che sono elettrizzati. Se ciò accade, dobbiamo aspettare che trascorrano diverse ore affinché si scarichino naturalmente attraverso l'aria. Possiamo quindi iniziare l'esperimento.

Ora strofiniamo una cannuccia di plastica tra i capelli. Portiamo la cannuccia in orizzontale vicino a ciascuno di questi quattro gruppi. Osserviamo che la forza più grande è esercitata sul gruppo *IV*, i pezzi di carta sulla superficie conduttrice, seguiti dal gruppo *II*, i pezzi di carta sulla superficie isolante. I gruppi *I* e *III*, i pezzi di plastica su entrambe le superfici, sono attratti molto debolmente ed è difficile capire quale dei due subisca un'attrazione più grande. L'intensità della forza può essere stimata in due modi. Il primo è osservando la distanza a cui la forza comincia ad essere rilevata, come indicato dal movimento dei pezzi di carta o di plastica. Maggiore è tale distanza, più intensa è la forza (Figura 7.45). La seconda procedura è osservare il numero di pezzi di carta o plastica che sono attratti dalla cannuccia strofinata quando essa è ad una distanza costante dal tavolo (ad esempio 5 o 10 cm).

Figura 7.45. (**a**) Pezzi di carta appoggiati su una superficie isolante e attratti da una cannuccia strofinata. (**b**) Pezzi di carta appoggiati su una superficie conduttrice e attratti da una cannuccia strofinata. La distanza minima alla quale la cannuccia può attrarre i pezzi di carta è più grande nel caso (**b**) che nel caso (**a**). Le frecce indicano la direzione del moto.

## Esperimento 7.33

Ora usiamo un pendolo elettrico costituito da un disco di carta sostenuto da un filo di seta. Strofiniamo una cannuccia di plastica *I* tra i capelli, in modo che diventi negativamente carica. Essa viene poi sostenuta su un supporto adeguato lontano dal pendolo. Una seconda cannuccia è caricata positivamente per sfregamento tra due tubi in gomma dura. Anche essa è posta su un simile supporto lontano dal pendolo e dalla prima cannuccia.

Tocchiamo il disco di carta con il dito. Portiamo poi lentamente la cannuccia *I* vicino ad esso. Il pendolo è attratto dalla cannuccia. Non permettiamo loro di entrare in contatto. Dopo aver allontanato la prima cannuccia, portiamo la seconda cannuccia vicino al pendolo. Il pendolo è attratto anche da questa cannuccia. Impediamo di nuovo che ci sia contatto.

Ora teniamo in mano un foglio di carta (o una piastra metallica) e mettiamolo in maniera angolata al di sotto del disco di carta sul lato opposto della cannuccia (Figura 7.46). Il foglio di carta deve toccare il disco.

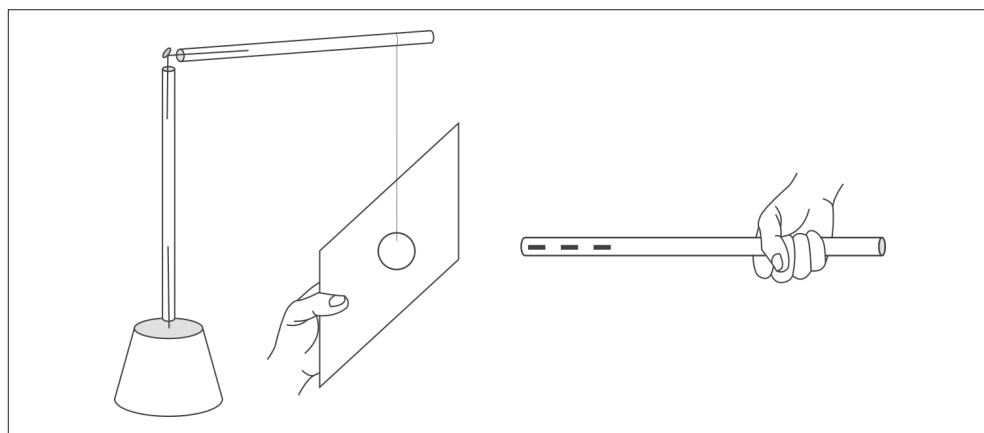
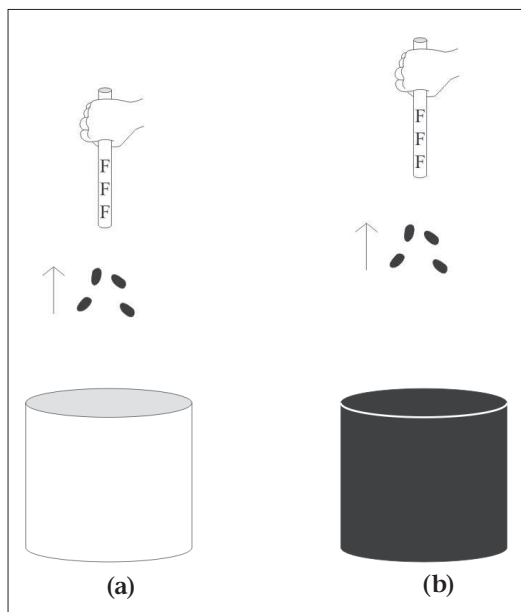



Figura 7.46. Inizialmente il disco di carta di un pendolo elettrico tocca il foglio di carta o la piastra metallica.

Poi portiamo la prima cannuccia vicino al pendolo in modo tale che il pendolo rimanga tra il foglio di carta e la cannuccia. Ad una certa distanza il disco si muove verso la cannuccia, allontanandosi dal foglio di carta. Quando questo accade, togliamo il foglio di carta, impedendo che il disco e la cannuccia entrino in contatto. Successivamente anche la cannuccia può essere rimossa e il pendolo tornerà alla verticale. Se noi

muoviamo ora di nuovo la cannuccia *I* verso il pendolo, vedremo attrazione. Bisogna evitare che essi entrino in contatto.

Allontaniamo la prima cannuccia e portiamo la cannuccia *II* lentamente verso il pendolo. Essa non deve essere portata troppo vicino al disco e dobbiamo guardare attentamente in quale direzione il disco tende a muoversi. Quando questo esperimento è eseguito correttamente, si osserva che il disco tende ad allontanarsi dalla cannuccia *II*, in quanto è respinto da essa! Questo indica che entrambi i corpi hanno cariche dello stesso segno: positivo. Se la cannuccia *II* è messa troppo vicino al disco, ci sarà un'attrazione tra di loro, come visto nella Sezione 7.10. Questo deve essere evitato.

### Esperimento 7.34

L'Esperimento 7.33 può essere ripetuto, invertendo l'ordine in cui le cannucce vengono avvicinate. Inizialmente la cannuccia *II*, che viene caricata positivamente, viene spostata in prossimità del disco di carta che tocca il foglio di carta. Questo foglio di carta deve essere rimosso quando il disco comincia a muoversi verso la cannuccia. Si deve impedire che essi entrino in contatto. Dopo che il foglio di carta è stato rimosso, anche la seconda cannuccia deve essere messa via. Se ora portiamo lentamente la cannuccia *I* verso il disco, si osserverà una repulsione. Questo indica che entrambi hanno cariche negative. Cioè, la carica acquisita dal disco è di segno opposto alla carica sulla seconda cannuccia.

### Esperimento 7.35

Ripetiamo gli Esperimenti 7.33 e 7.34, ma ora tocchiamo il disco di carta con un pannello in polistirolo. Alla fine di questo esperimento osserviamo che il disco è attratto da entrambe le cannucce, *I* e *II*, indipendentemente da quale di esse si stata mossa per prima verso il disco.

Gli Esperimenti 7.33 e 7.34 mostrano che quando un pezzo di carta (in questo caso il disco), appoggiato su un foglio di carta conduttrice, è attratto da una cannuccia elettrizzata, c'è un'elettrizzazione del pezzo di carta. Inoltre, la carica che essa acquisisce dopo aver toccato ed essere allontanato dal foglio di carta è di segno opposto rispetto alla cannuccia elettrizzata. L'Esperimento 7.35, al contrario, mostra che un pezzo di carta, quando è appoggiato ad un pannello isolante di polistirolo, non acquista alcuna carica complessiva dopo essere stato attratto da una cannuccia elettrizzata. Ciò significa che non vi è alcuna carica risultante sul piccolo pezzo di carta dopo che è stato allontanato dal pannello di polistirolo.

## Note

1 [Aep79, p. 62].
2 [Aep79, pp. 312-314].
3 [Hei99, p. 495].
4 [Aep79], [Hei81a] e [Hei99, pp. 384-402].
5 [Aep79, pp. 312-314].
6 [DF33d, pp. 233-234] e [Aep79, pp. 261, 274 e 309-315].
7 [Grab, p. 107].
8 [AH07, Sezione 5.3], [Ah09, Sezione 5.3] e le fonti ivi contenute.
9 [DF, p. 265].
10 [Aep79, pp. 126 e 315-325], [BWc] e[Hei99, pp. 396-398].
11 [Max81, Capitolo VII: Theory of electrical images, pp. 80-88], [Mel98] e [Jac99, Sezione 2.3].
12 [Grad] e [Hei99, p. 253].
13 [DF33a, p. 34] e [DF33c, p. 84].
14 [Tho], [Llo80] e [CA08].

# Capitolo 8

# Considerazioni finali

## 8.1 Cambiare nomi e significati: da corpi elettrici e non-elettrici ad isolanti e conduttori

Nel 1600 Gilbert aveva classificato i corpi come elettrici e non elettrici, come abbiamo visto nelle Sezioni 2.7 e 2.8. I materiali elettrici come l'ambra erano quelli che, dopo essere stati strofinati, acquisivano la proprietà di attrarre oggetti leggeri vicino a loro. I materiali non elettrici non acquisivano questa proprietà con lo sfregamento. Tutti i metalli, in particolare, erano considerati non elettrici.

Nel 1729 Gray scoprì che, mettendo un corpo elettrizzato come del vetro flint strofinato in contatto o in prossimità di un metallo, il metallo acquisiva la proprietà di attrarre sostanze leggere nelle vicinanze. Abbiamo visto gli esperimenti che mostrano questo effetto nella Sezione 7.4. Le procedure di Gray verranno discusse in dettaglio nell'Appendice B. Lo stesso comportamento attrattivo era osservato anche con altri corpi che erano classificati come non elettrici al tempo di Gray. Du Fay scoprì il meccanismo ACR, mostrando che un pezzo sottile di metallo diventava elettrizzato entrando in contatto con un altro corpo strofinato (Sezione 4.8). Più tardi, si è imparato come elettrizzare un pezzo di metallo per induzione utilizzando la polarizzazione elettrica e la messa a terra elettrica (Sezione 7.5). Negli anni '70 del 1700 si scoprì che i metalli potevano anche essere elettrizzati per strofinio, a condizione che fossero isolati da terra (Sezione 6.8). Queste scoperte portarono all'abbandono della nomenclatura e dello schema di classificazione di Gilbert. Da allora abbiamo adottato un'altra classificazione. I materiali sono ora classificati come *conduttori* e *isolanti*. Queste espressioni sono dovute a Du Fay e Desaguliers (Sottosezione 6.3.1). La maggior parte dei corpi che Gilbert classificava come elettrici sono ora chiamati isolanti. I corpi che venivano chiamati non elettrici sono ora detti conduttori. Qui però c'è una novità concettuale. Non si tratta solo di un cambiamento di nomi o una semplice variazione di nomenclatura. Dopotutto, è possibile fare in modo che i metalli attraggano oggetti leggeri dopo essere strofinati, a condizione che essi siano isolati durante lo sfregamento. Lo stesso accade con altri materiali che sono isolanti. È la distinzione di Gilbert che non ha più senso. Ciò che caratterizza i conduttori ideali è il fatto che essi abbiano cariche elettriche mobili e permettano il passaggio o il flusso di cariche attraverso di loro. Gli isolanti ideali, d'altra parte, non hanno cariche mobili, ad eccezione dell'interno delle loro molecole. Inoltre, gli isolanti non consentono il passaggio o il flusso di cariche attraverso di essi.

C'è una gradazione tra buoni conduttori e buoni isolanti. Inoltre, queste proprietà non dipendono solo dalle caratteristiche intrinseche di tali corpi, ma anche dalle condizioni esterne a cui essi sono sottoposti. In ogni caso, la distinzione tra sostanze conduttrici e isolanti è una delle caratteristiche più importanti di tutta la scienza dell'elettricità.

## 8.2 Fatti semplici e primitivi riguardanti l'elettricità

Dopo aver eseguito gli esperimenti descritti in questo libro abbiamo raggiunto una ragionevole conoscenza dell'elettricità. Ovviamente non abbiamo coperto tutti i possibili aspetti della materia. In ogni caso, ora abbiamo una nozione precisa dei fenomeni principali dell'elettricità. In questa Sezione presentiamo – per usare le parole di Du Fay – i fatti o i principi semplici e primitivi dell'elettricità[1]. Descriviamo dunque solo

le osservazioni sperimentali, senza spiegarle. Di conseguenza, le possiamo considerare primitive. Cioè, questi semplici dati possono essere impiegati per spiegare altri fenomeni e anche per interpretare esperimenti più complicati, ma non per esporre i principi fondamentali. Non è mai possibile spiegare tutto. È sempre necessario partire da alcuni fatti iniziali o assumerli come veri. Utilizziamo poi questi presupposti per spiegare altre osservazioni della natura. Ecco i fatti primitivi:

1. In natura, un corpo può trovarsi in tre diversi stati detti elettricamente neutro, carico positivamente e carico negativamente. Si dice anche che i corpi hanno, rispettivamente, carica nulla, carica positiva e carica negativa. Possiamo anche dire che i corpi non sono elettrizzati, sono elettrizzati positivamente e negativamente.
2. Questi stati sono caratterizzati dal comportamento dei corpi che viene osservato. Due corpi neutri non si attraggono né si respingono l'un l'altro. C'è attrazione tra un corpo positivo ed un corpo inizialmente neutro. C'è anche attrazione tra un corpo negativo ed un corpo inizialmente neutro. Corpi con cariche di segno opposto si attraggono. Corpi con cariche dello stesso segno normalmente si respingono, ma in alcune situazioni si possono anche attrarre.
3. Queste forze di attrazione e repulsione aumentano d'intensità quando la distanza fra i corpi interagenti diminuisce. L'intensità delle suddette forze aumenta anche quando la quantità della carica nei corpi aumenta. Queste forze sono reciproche ed agiscono con la stessa intensità su entrambi i corpi interagenti. Esse sono dirette lungo la linea retta che collega i corpi, ma in direzioni opposte.
4. I corpi possono essere divisi in due gruppi chiamati conduttori e isolanti. La principale differenza tra questi due gruppi è che i conduttori hanno cariche mobili e permettono il passaggio o flusso di cariche elettriche attraverso di essi. Gli isolanti, al contrario, non hanno cariche mobili, tranne che all'interno delle loro molecole. Gli isolanti non permettono il passaggio o il flusso di cariche attraverso di essi.
5. I conduttori e gli isolanti possono essere elettricamente neutri, positivi o negativi. Quando un conduttore carico tocca il suolo, si scarica. Questo processo è chiamato messa a terra. Lo stesso scaricamento non avviene per un isolante carico che tocca il suolo. Un altro modo di eseguire questa classificazione è di toccare una delle estremità del corpo col cartoncino di un elettroscopio elettrizzato e all'altra estremità del corpo far toccare il suolo. I corpi che scaricano l'elettroscopio sono chiamati conduttori, mentre i corpi con non scaricano l'elettroscopio sono chiamati isolanti.
6. Un corpo, che si comporta come isolante se sottoposto ad una piccola differenza di potenziale elettrico, può comportarsi come conduttore quando questa differenza di potenziale aumenta oltre un certo valore. Nella maggior parte dei casi, i corpi solidi e liquidi si comportano come conduttori nei comuni esperimenti di elettrostatica, mentre pochi di loro sono isolanti. Tra gli isolanti possiamo citare l'aria secca, l'ambra, la seta, e la maggior parte delle materie plastiche e delle resine.
7. Il comportamento di un corpo come conduttore o isolante dipende anche da altri aspetti. Supponiamo che un'estremità del corpo tocchi il cartone dell'elettroscopio elettrizzato, mentre un'altra estremità del corpo tocchi il suolo. I fattori che influenzano le proprietà di questo corpo sono i seguenti: (a) Il tempo necessario per scaricare un elettroscopio (maggiore è il tempo di contatto, maggiore sarà l'entità della scarica). (b) La lunghezza del corpo (maggiore è la lunghezza, più lenta sarà la scarica). E (c), la sezione trasversale del corpo (maggiore è quest'area, più veloce sarà la scarica).
8. I corpi neutri possono essere caricati attraverso diversi meccanismi. La procedura più comune è lo sfregamento di due corpi neutri. Dopo lo sfregamento, uno dei corpi strofinati diventa positivo e l'altro negativo. Gli isolanti si caricano solo sulla parte di superficie effettivamente strofinata. La carica acquisita dai conduttori sfregati, invece, si propaga sulle loro superfici esterne quando essi sono completamente circondati da isolanti o va a terra se c'è un contatto conduttivo col suolo.

9. Un conduttore neutro può anche acquisire della carica da un isolante carico quando sono messi in contatto tra loro, senza alcuno strofinio. La carica acquisita dal conduttore ha lo stesso segno di quella dell'isolante. In questo processo la quantità di carica persa dall'isolante è pari a quella acquisita dal conduttore. Al contrario, la quantità di carica acquisita da un isolante neutro quando tocca un altro isolante carico è trascurabile, se non c'è sfregamento tra di loro.
10. I conduttori si polarizzano elettricamente in presenza di un corpo carico posto nelle vicinanze. La parte del conduttore più vicina al corpo carico si elettrizza di segno opposto a quella del corpo carico. La parte più lontana, invece, si elettrizza dello stesso segno, quando il conduttore è isolato elettricamente. Se il conduttore è isolato e se queste due parti vengono fisicamente separate in presenza del vicino corpo carico, esse si elettrizzeranno di segno opposto.
11. Se il conduttore è collegato elettricamente a terra in presenza del vicino corpo carico, la porzione del conduttore più distante dal corpo carico verrà neutralizzata. Questo fatto permette al conduttore di essere elettrizzato con una carica di segno opposto rispetto al corpo vicino.
12. Le molecole di un isolante vengono polarizzate in presenza di un corpo carico posto vicino ad esso. La parte di qualsiasi molecola che è più prossima al (lontana dal) corpo carico si elettrizza di segno opposto (uguale) a quest'ultimo. Le cariche polarizzate restano confinate nelle suddette molecole e non si spostano lungo l'isolante. Inoltre, esse non sono cedute ad un altro conduttore che entri in contatto con l'isolante.
13. Il numero di cariche polarizzate in conduttori vicini a un corpo carico aumenta quando la distanza tra loro diminuisce. Lo stesso accade con le effettive cariche polarizzate degli isolanti vicini ad un corpo carico.
14. Vi è una maggiore polarizzazione di conduttori e isolanti quando aumenta il grado di elettrizzazione del vicino corpo carico.
15. Una forza di origine non elettrostatica mantiene ferme le cariche sulle superfici dei conduttori e degli isolanti quando questi corpi sono elettrizzati o polarizzati. Una forza di origine non elettrostatica è anche responsabile della generazione di cariche opposte quando due corpi sono strofinati l'uno contro l'altro.

Nel descrivere questi semplici fatti, dovremmo tenere a mente che stiamo parlando in termini generali, riferendoci implicitamente agli esperimenti descritti in questo libro. Tutti questi effetti dipendono dall'ordine di grandezza degli esperimenti e ci sono sempre delle eccezioni in tutte le descrizioni sperimentali. Per esempio, quando diciamo che due corpi neutri non interagiscono tra loro, non stiamo considerando l'attrazione gravitazionale tra di loro esistente. La ragione è che questa interazione gravitazionale non si osserva o non può essere rilevata in esperimenti comuni che coinvolgono piccoli corpi leggeri. Essa manifesta il suo effetto solo quando almeno uno dei corpi è di dimensioni astronomiche, come la nostra Terra. Quando diciamo che un corpo carico attira un corpo che è inizialmente neutro, si presume che si tratti di corpi leggeri o di corpi sostenuti da corde in modo tale che sia piccola la loro resistenza al movimento laterale. Così, i corpi neutri si potranno spostare vicino al corpo carico quando c'è attrazione tra di loro. Inoltre, perché sia osservabile questo effetto di attrazione, non deve essere molto grande la distanza tra i corpi interagenti né molto piccola la carica sul corpo strofinato, altrimenti questi movimenti non sono percepibili. Lo stesso vale per gli altri fatti considerati.

## 8.3 Descrizione dell'effetto ambra

Tali regole primitive possono essere utilizzate per spiegare o descrivere fenomeni più complessi. Qui però noi le usiamo per esporre ciò che si vede nell'Esperimento 2.1,

che è analogo all'effetto ambra, il primo esperimento nella storia dell'elettricità. In tale esperimento una cannuccia di plastica non strofinata non attirava piccoli pezzi di carta, mentre lo faceva una cannuccia strofinata allorché era avvicinata ad essi, come nelle Figure 2.1 e 2.3. L'Esperimento 2.11 forniva un risultato diverso. In questo caso, uno spiedino di legno, strofinato o non strofinato, non attirava pezzi di carta (Figura 2.9). Negli Esperimenti 2.3, 7.18, e 7.20 abbiamo osservato che una cannuccia di plastica strofinata esercita una forza maggiore su piccoli pezzi di carta che su piccoli pezzi di plastica aventi circa lo stesso peso e la stessa forma di quelli di carta.

Negli Esperimenti dal 7.32 al 7.35 è stato mostrato che pezzi di carta appoggiati su una superficie conduttrice sperimentano una maggiore attrazione da parte di una cannuccia di plastica strofinata, posta lì vicino, rispetto agli stessi pezzi di carta messi su una superficie isolante. Inoltre, pezzi di carta sopra una superficie conduttrice acquisiscono una carica dopo essere stati attratti da un corpo carico vicino. La carica acquisita dai pezzi di carta ha un segno opposto rispetto al segno del corpo che li attirava.

In questi esperimenti i corpi che si comportavano come isolanti erano l'aria, la cannuccia di plastica strofinata, il filo di seta del pendolo elettrico, il pannello di polistirolo ed i piccoli pezzi di plastica che venivano attratti. La cannuccia di plastica era stata strofinata con i capelli. Da quanto visto nella Sezione 5.4, la cannuccia acquisiva una carica negativa. Anche se tenuta in mano, non si scaricava perché la plastica è un isolante.

I corpi che si comportavano come conduttori in questi esperimenti erano la terra, il corpo umano, lo spiedino di legno, il disco di carta del pendolo elettrico, il foglio di carta al quale si appoggiava questo disco di carta ed i piccoli pezzi di carta che erano attratti dalla cannuccia. Non è stato possibile attrarre i pezzi di carta con uno spiedino strofinato.

Quando lo spiedino viene strofinato, esso può avere momentaneamente acquisito una carica elettrica. Ma poiché in questa situazione si comportava come conduttore ed era tenuto da noi in mano, cioè a contatto con la terra, il legno era messo a terra. In definitiva, tutta la carica prodottasi sullo spiedino durante il processo di sfregamento sarebbe stata immediatamente neutralizzata. Proprio per ciò, esso non attirava i piccoli pezzi di carta, anche dopo essere stato strofinato. Un conduttore può mantenere le cariche acquisite per attrito solo quando è isolato, come visto nella Sezione 6.8.

La cannuccia di plastica potrebbe essere strofinata con isolanti (capelli, un panno di seta o un sacchetto di plastica) o con conduttori (la mano, un foglio di carta o un panno di cotone). Non è importante sapere se isolante o conduttore. Ma il segno della carica da essa acquisita dipenderà dal tipo di materiale con cui è stata strofinata, cioè, se da un isolante o un conduttore.

L'attrazione che la cannuccia strofinata esercitava su un pezzo di plastica può essere illustrata microscopicamente utilizzando un pendolo di plastica. Come sempre, bisogna fare attenzione ad utilizzare un disco di plastica ritagliato da un sacchetto di plastica che si comporta come isolante. Inoltre, questo disco di plastica deve essere neutro quando è lontano da altri corpi elettrizzati. In questo caso, quando si passa la cannuccia strofinata vicino al disco di plastica del pendolo, osserviamo tra di loro una piccola attrazione. Si presume che le molecole di plastica vengano polarizzate in presenza della plastica strofinata. La porzione di ogni molecola che è più vicina al corpo strofinato si elettrizza di segno opposto ad esso.

Mentre quella più lontana si elettrizza dello stesso segno. Ciò viene illustrato nella Figura 8.1(a). L'interno della plastica polarizzata si comporta macroscopicamente come se fosse neutra, a causa della cancellazione delle cariche di segno opposto vicine. Ma la superficie della plastica polarizzata si comporta come se avesse una carica effettiva, come illustrato in Figura 8.1 (b).

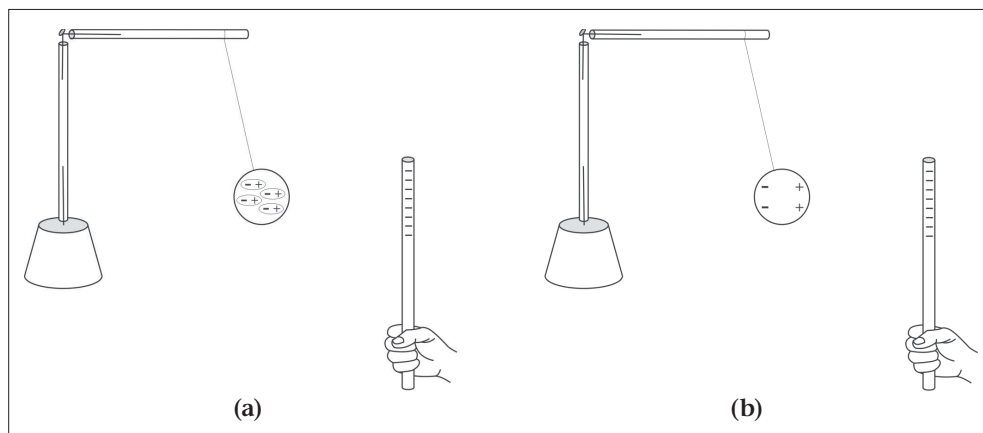



Figura 8.1. **(a)** Una plastica strofinata che polarizza e attira un disco di plastica. **(b)** Polarizzazione effettiva del disco di plastica.

Si assume che le molecole di plastica siano polarizzate dalla presenza della vicina cannuccia strofinata a causa dell'esistenza di cariche positive e negative in ogni molecola. Inoltre, queste cariche positive e negative devono essere mobili all'interno di ogni molecola. La polarizzazione di ogni molecola è dovuta anche al fatto che cariche dello stesso segno si respingono, mentre cariche di segno opposto si attraggono. Qualche forza di origine non-elettrostatica impedisce alle cariche polarizzate di spostarsi indefinitamente lontano l'una dall'altra. Quanto più intensa è la carica sulla cannuccia, tanto maggiore risulta la polarizzazione del disco di plastica. Tale polarizzazione aumenta anche al decrescere della distanza tra cannuccia e disco. Maggiore è l'effettiva polarizzazione del disco di plastica, più intensa sarà la forza risultante su di esso.

La polarizzazione della plastica non cambia di molto se essa viene appoggiata ad un pannello isolante di polistirolo o su di un foglio conduttore di carta. La plastica non riceve carica in questi due casi.

L'attrazione osservata tra cannuccia strofinata e plastica polarizzata può essere una conseguenza di un'ulteriore proprietà delle forze elettriche: le forze di attrazione e di repulsione aumentano in intensità quando le distanze tra le cariche diminuiscono. Pertanto, la forza di attrazione tra la cannuccia e le cariche effettive sulla superficie della plastica più vicina ad essa è maggiore della forza repulsiva tra la stessa cannuccia e le cariche dello stesso segno sulla superficie della plastica più distante da essa. La somma di queste due forze non è nulla. La forza attrattiva è maggiore della forza repulsiva. Queste forze parziali di differente intensità generano una forza attrattiva risultante tra la cannuccia strofinata e la plastica polarizzata.

Analizziamo ora l'attrazione esercitata dalla cannuccia strofinata su un conduttore, come lo è un piccolo pezzo di carta. Assumiamo inizialmente che questo pezzo di carta sia il disco di carta di un pendolo elettrico tenuto sospeso da una filo di seta o di nylon (materiali isolanti). Questo caso è diverso da quello del disco di plastica per due motivi. Il primo è che la polarizzazione di un conduttore è dovuta al moto di cariche libere attraverso tutto il conduttore. Cioè, vi è una vera polarizzazione macroscopica del conduttore e non solo una polarizzazione delle sue molecole (Figura 8.2).

La seconda differenza è che questa polarizzazione è di maggiore intensità rispetto a quella di un isolante in presenza della cannuccia strofinata. Ciò comporta che una forza più intensa venga esercitata dalla cannuccia strofinata sul disco di carta rispetto a quella della stessa cannuccia su un disco di plastica. Qui stiamo assumendo che i dischi di

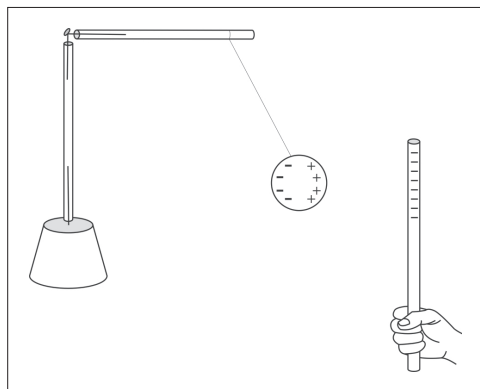



Figura 8.2. Una cannuccia strofinata che polarizza ed attira un disco di carta.

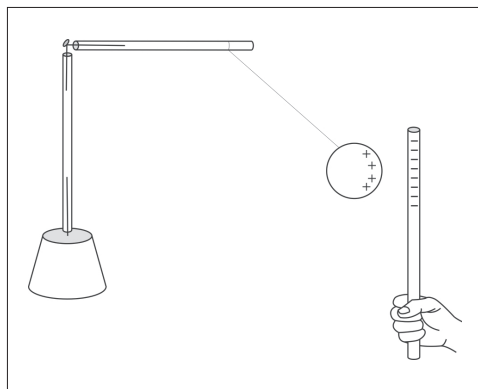



Figura 8.3. Un disco di carta elettrizzato è attratto da una cannuccia strofinata.

carta e di plastica siano della stessa forma e dimensione e che entrambi stiano alla stessa distanza dalla cannuccia. Possiamo notare questa seconda differenza confrontando le Figure 8.2 e 8.1. Il filo di seta del pendolo con disco di carta è più inclinato rispetto alla verticale del filo di seta del pendolo con disco di plastica. In entrambe le situazioni vi è la stessa distanza tra la cannuccia e il pendolo. Ciò indica che la forza sulla carta conduttrice è maggiore della forza sulla plastica isolante. Ancora una volta, c'è una forza di origine non-elettrostatica che impedisce a queste cariche polarizzate di separarsi ancor più tra loro, liberandosi in aria al di là del disco di carta. È proprio questa forza di origine non elettrostatica a mantenere le cariche polarizzate sul bordo del disco di carta, impedendo loro di scaricarsi attraverso l'aria.

Se il disco di carta viene collegato a terra mentre è polarizzato, le cariche che su di esso sono lontane dalla cannuccia sono neutralizzate da cariche della Terra. Ciò è analogo a quello che abbiamo visto nella Figura 7.30. In questo caso, il disco di carta ha una carica complessiva diversa da zero, di segno opposto alla cannuccia che abbiamo avvicinato ad esso. Pertanto, detto disco sperimenta un'attrazione da parte della cannuccia più forte di quella che quest'ultima eserciterebbe sul disco polarizzato. Nella presente situazione, infatti, non esiste più repulsione tra cannuccia strofinata e cariche dello stesso segno, che prima erano sulla parte più lontana del disco di carta (Figura 8.3).

Nella Figura 8.4 confrontiamo questi tre casi. Supponiamo che in tutti i casi la cannuccia strofinata è alla stessa distanza dal pendolo elettrico. In (a) abbiamo una piccola forza di attrazione esercitata su un disco di plastica che è polarizzato da una cannuccia vicina elettrizzata. In (b) vi è una forza più intensa esercitata su un disco conduttore che è più fortemente polarizzato. In (c) c'è una forza di attrazione ancora più intensa esercitata da una cannuccia elettrizzata su un disco conduttore carico.

La descrizione microscopica di ciò che accade con il piccolo pezzo di carta (un conduttore), appoggiato ad un piatto di polistirolo (un isolante) quando avviciniamo una cannuccia elettrizzata ad esso nell'Esperimento 7.32 è illustrata nella Figura 8.5.

La carta conduttrice è rappresentata dal rettangolo nero. Il polistirolo isolante è rappresentato dal rettangolo bianco più grande. Quando una cannuccia elettrizzata è posta sopra la carta, ma lontano da essa, la carta e il polistirolo si polarizzano (Figura 8.5 (a)). Una forza elettrostatica attrattiva si manifesta tra la cannuccia e il pezzo di carta. Dato che questa forza è inferiore al peso della carta, questa non si muove verso la cannuccia. Spostando la cannuccia ancora più vicino alla carta, aumentiamo la polarizzazione della carta e del polistirolo. Ciò incrementa la forza di attrazione tra la cannuccia e la carta.

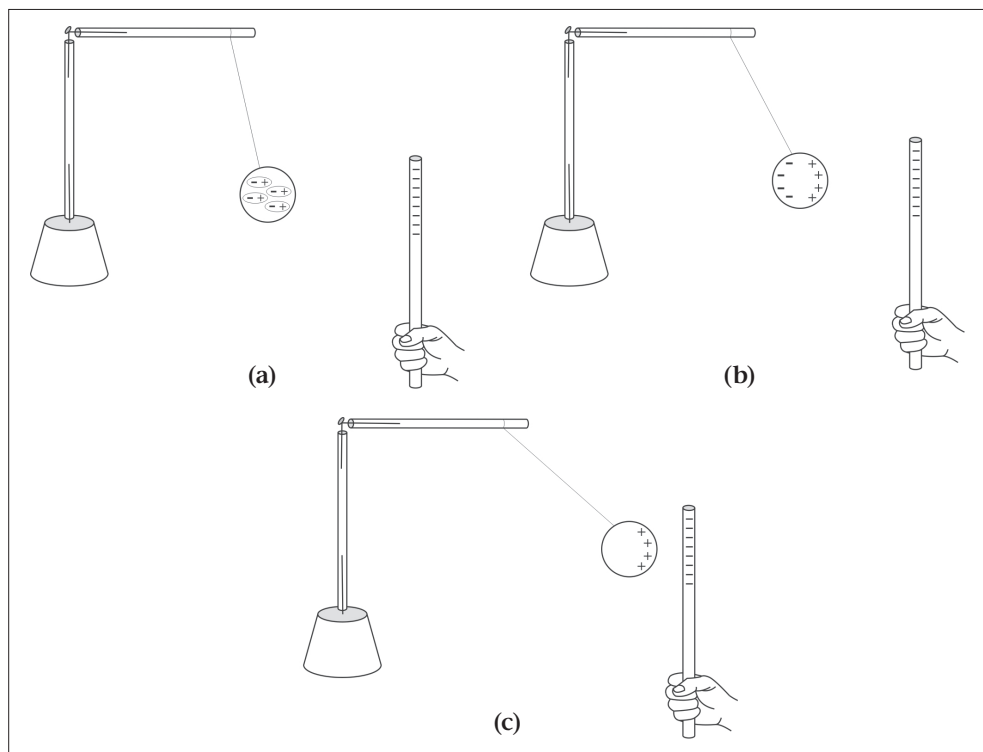



Figura 8.4. **(a)** Un isolante polarizzato attratto da un corpo vicino elettrizzato. **(b)** Un conduttore polarizzato attratto. **(c)** Un conduttore carico attratto. La forza aumenta da **(a)** a **(c)**, con la cannuccia strofinata alla stessa distanza dai pendoli elettrici.

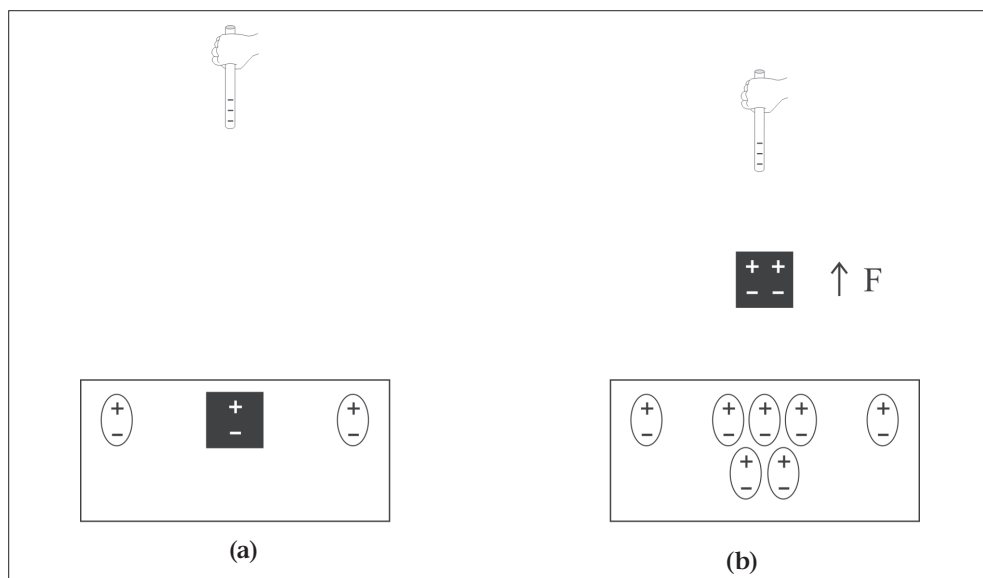



Figura 8.5. **(a)** Un pezzo di carta polarizzato appoggiato su un pannello di polistirolo polarizzato in presenza di una cannuccia elettrizzata che è lontana dalla carta. **(b)** Spostando la cannuccia ancora di più verso la carta, aumentiamo la polarizzazione della carta e del polistirolo. Questo crea una forza elettrostatica attrattiva sul foglio, che può essere più grande rispetto al suo peso. Se questo accade, la carta si muove verso la cannuccia.

Quando la distanza tra la cannuccia e la carta è inferiore o uguale ad un certo valore $d_1$, la forza elettrostatica diventa maggiore del peso della carta. La carta si sposta quindi verso la cannuccia (Figura 8.5 (b)). L'intensità della forza è indicata dalla dimensione della freccia.

Processi diversi hanno luogo quando, all'inizio, il pezzo di carta è posto su un foglio ugualmente di carta (Figura 8.6).

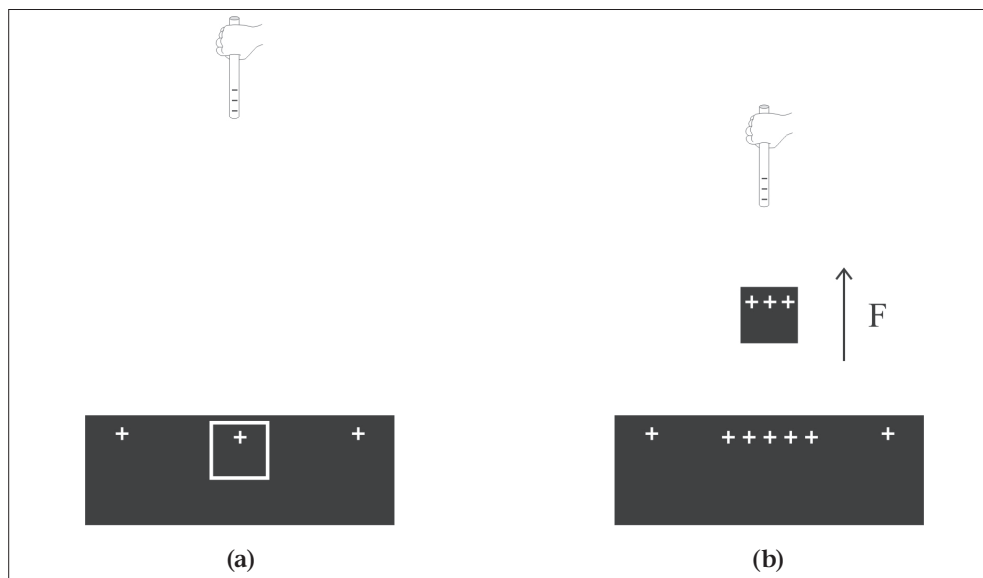



Figura 8.6. **(a)** Un pezzo di carta elettrizzato posto su un foglio di carta elettrizzato in presenza di una cannuccia elettrizzata che è lontana dalla carta. **(b)** Avvicinando ancor di più la cannuccia al pezzo di carta, aumentiamo l'elettrizzazione sia del pezzo di carta che del foglio di carta. Ciò genera una forza elettrostatica sul pezzo di carta che può essere maggiore del suo peso. Il pezzo di carta può quindi muoversi verso la cannuccia.

Il primo è rappresentato dal piccolo rettangolo nero, mentre il secondo è rappresentato dal rettangolo nero più grande. Mettendo una cannuccia elettrizzata al di sopra della carta, ma lontana da essa, creiamo una ridistribuzione delle cariche sul piano. Di conseguenza, la superficie del pezzo di carta e quella del foglio di carta si elettrizzano con cariche di segno opposto a quelle della cannuccia (Figura 8.6 (a)). Tra il pezzo di carta e la cannuccia viene quindi generata una forza di attrazione elettrostatica.

Poiché questa forza elettrostatica è inferiore al peso del pezzo di carta, esso non si muove verso la cannuccia. Avvicinando ancor di più la cannuccia al pezzo di carta, il pezzo di carta e il foglio di carta si elettrizzano maggiormente. Quando la distanza tra la cannuccia e il pezzo di carta è inferiore o uguale ad un certo valore $d_2$, la forza elettrostatica diventa più grande del peso del pezzo di carta. Quest'ultimo, quindi, inizia a muoversi verso la cannuccia (Figura 8.6 (b)). La distanza $d_2$ è maggiore della distanza $d_1$ precedente (Figura 7.45).

Supponiamo che i pezzi di carta si stiano muovendo in aria, attratti dalla cannuccia strofinata. Mettiamo ora a confronto due casi. Nel primo, il pezzo di carta era inizialmente posto su una superficie isolante. Nel secondo caso, invece, era inizialmente posto su una superficie conduttrice. Si assume che la cannuccia sia alla stessa distanza da entrambe le superfici. Immagineremo anche che entrambi i pezzi di carta siano a metà strada tra le superfici inferiori e la cannuccia. Le intensità delle forze sono indicate dalle

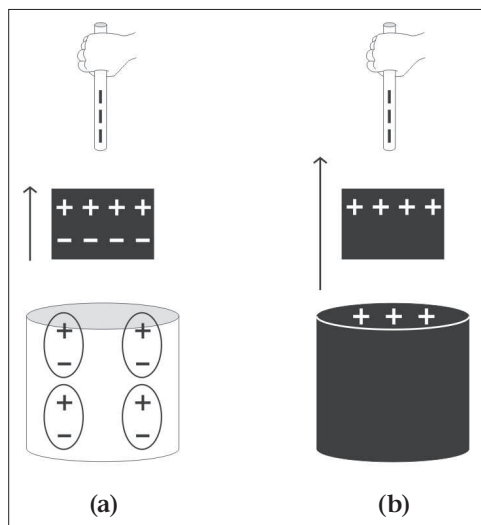



Figura 8.7. **(a)** Pezzo di carta polarizzato, inizialmente appoggiato ad una superficie isolante, che viene attratto da una cannuccia strofinata. **(b)** Pezzo di carta elettrizzato, inizialmente appoggiato ad una superficie conduttrice, ed attratto da una cannuccia strofinata. Le dimensioni delle frecce indicano le intensità delle forze, supponendo le stesse distanze in entrambi i casi.

dimensioni delle frecce: più piccola nella prima situazione che nella seconda. Questo può essere visualizzato confrontando le Figure 8.5 e 8.6 (Figura 8.7). La ragione di questa differenza è che nel secondo caso vi è una carica complessiva sul pezzo di carta, di segno opposto rispetto alla carica della cannuccia. Questo non accade nella prima situazione. Inoltre, nella seconda situazione, sul pezzo di carta, c'è anche una forza repulsiva, che viene esercitata dalla superficie inferiore conduttrice. Ciò è dovuto al fatto che questi due corpi hanno cariche dello stesso segno.

Nell'Esperimento 2.1 non è facile rilevare la carica complessiva sul pezzo di carta quando esso si sta muovendo verso la cannuccia strofinata, dopo che è stato rimosso dalla superficie del terreno o da un tavolo. Tuttavia, questo può essere mostrato attraverso accurate osservazioni, come indicato negli Esperimenti 7.33 e 7.34. Nella Figura 8.7 illustriamo microscopicamente ciò che stava accadendo nella Figura 7.45.

*È una sorpresa per molte persone che nel più antico esperimento di elettricità, come quello dell'Esperimento 2.1, l'oggetto leggero e la terra si comportino come conduttori. Ancora più sorprendente è il fatto che, in generale, l'oggetto leggero ha una certa carica quando si sta muovendo verso la plastica strofinata. Nonostante le sorprese, questa è la situazione più comune in cui le attrazioni elettrostatiche vengono osservate. Cioè, normalmente quando un materiale solido o liquido è notevolmente attratto da un corpo elettrizzato, esso sarà un conduttore. Se fosse un isolante, la forza complessiva su di esso di solito sarebbe piccola, rendendo difficile osservare il suo movimento. Inoltre, siccome di solito il materiale conduttore che viene attratto era precedentemente appoggiato ad un altro conduttore (come il suolo, il corpo umano, una tavola di legno, un foglio di carta, o una piastra metallica), esso avrà una certa carica mentre è in movimento verso la plastica strofinata. E in questa situazione la carica complessiva sull'oggetto leggero conduttore sarà di segno opposto a quella del corpo elettrizzato che l'attrae.*

Il generatore elettrostatico di Kelvin (Sottosezione 7.12.1) è analogo agli Esperimenti dal 7.32 al 7.34. La differenza è che esso faceva uso di gocce d'acqua invece che di piccoli pezzi di carta.

Non stiamo volutamente considerando le influenze sull'esperimento dell'effetto ambra da parte di altri corpi vicini. E neppure quello che sarebbe successo se ci fosse stata una lastra conduttrice o isolante tra la cannuccia strofinata e le sostanze leggere. Né tantomeno l'influenza della forma del supporto sulla forza complessiva esercitata sulla sostanza leggera.

Questi fenomeni possono non accadere o si possono manifestare solo con piccole intensità, se la cannuccia strofinata diventa umida a causa del sudore della mano o a causa dell'umidità dell'aria circostante. Poiché l'acqua dolce si comporta come un conduttore in questi esperimenti, essa può contribuire a scaricare la cannuccia strofinata. Il che può accadere sia attraverso la mano che tramite l'aria circostante.

Dopo essere entrato in contatto con la cannuccia elettrizzata, il piccolo oggetto conduttore può ricevere una carica dello stesso segno della cannuccia a causa del meccani-

smo ACR. Dopo il contatto, l'oggetto cadrà a terra sia a causa del suo peso che a causa della repulsione elettrica esercitata dalla cannuccia. Questo meccanismo non funziona altrettanto bene quando a venir a contatto con la cannuccia strofinata è un materiale isolante. Pertanto, dopo essere stato attratto ed aver toccato la cannuccia, dopo un po' di tempo l'isolante cade a terra a causa sia del peso sia della perdita di elettrizzazione che avviene naturalmente nella cannuccia. Tale fenomeno è dovuto alla conducibilità dell'aria secca, benché l'entità di questa sia piccola.

Come possiamo vedere, nell'esperimento dell'effetto ambra, che è analogo all'Esperimento 2.1, si verificano un gran numero di fenomeni e processi. Ecco perché c'è voluto così tanto tempo per giungere ad una chiara percezione di ciò che stava avvenendo. Inoltre, stiamo solo descrivendo nel dettaglio i molti processi microscopici che accadono, ma non stiamo spiegando l'esperimento. Dopo tutto, non abbiamo chiarito perché cariche di segno opposto si attraggono a vicenda, né i meccanismi responsabili dell'elettrizzazione per strofinio, né le ragioni per cui alcuni corpi si comportano come conduttori mentre altri si comportano come isolanti, né l'origine delle forze non elettrostatiche che mantengono le cariche sulle superfici di conduttori e isolanti elettrizzati o polarizzati; né abbiamo esplicato il motivo per cui la forza dipende dalla distanza, il perché della serie triboelettrica o le ragioni per cui un certo corpo *A* diventa carico negativamente essendo strofinato contro una certo corpo *B* (invece di caricarsi positivamente, o invece di continuare a essere elettricamente neutro), ecc..

In ogni caso, oggi abbiamo una ragionevole conoscenza di ciò che accade in molti fenomeni elettrici. Inoltre, siamo in grado di controllare molteplici meccanismi coinvolti in questi processi. Questo rappresenta certamente un grande progresso nel nostro dominio sulla natura e nella nostra comprensione di molti fenomeni fisici.

La storia dell'elettricità è relativamente breve se confrontata con l'astronomia, la geometria, o la meccanica. Questo è il motivo per cui abbiamo ancora accesso agli scritti di alcuni dei principali scienziati responsabili della scoperta dei più importanti fenomeni elettrici. È affascinante riprodurre i loro esperimenti con materiali semplici e poco costosi. È anche molto interessante leggere i resoconti dei loro lavori e vedere come essi hanno reagito alle loro scoperte, ciò che li guidava, ecc..

Con questo libro speriamo di aiutare altri a seguire gli affascinanti sentieri della natura, così come sono stati scoperti da alcuni dei più importanti scienziati agli albori della storia dell'elettricità.

## Note

[1] [DF34b, p. 525]

# Appendice A

## Definizioni

Qui vi presentiamo le definizioni di alcune parole utilizzate in questo libro.

**Ambra** Una resina fossile, dura, traslucida, giallastra o marrone.

**Giaietto** Una varietà di lignite, carbone compatto di color nero brillante che può essere ben lucidato.

**Budello** Una corda dura fatta di solito di intestini di pecora.

**Copale** Una resina recente o fossile di diversi alberi tropicali.

**Vetro Flint** Un vetro brillante pesante che contiene ossido di piombo.

**Lacca** Una sostanza resinosa secreta da cocciniglie e utilizzata principalmente in forma di gommalacca.

**Nylon** Uno qualsiasi di quei numerosi e resistenti materiali poliammidici sintetici ed elastici che sono modellati in fibre, filamenti, setole o fogli e utilizzati soprattutto in tessuti e plastica.

**Poliammide** Un polimero contenente gruppi ammidici ripetuti, una ammide polimerica. Il nylon è un materiale di poliammide sintetica.

**Poliestere** I poliesteri sono una categoria di polimeri contenenti il gruppo funzionale estere nella loro catena principale.

**Resina** Ognuna delle varie sostanze organiche naturali, infiammabili, fondibili e amorfe, solide o semisolide, che sono generalmente trasparenti o traslucide e da giallastre a marroni, e che si formano soprattutto nelle secrezioni vegetali.

# Appendice B

## Stephen Gray
## e la scoperta della conduzione elettrica

Uno degli aspetti più importanti di tutta la scienza dell'elettricità è il fatto che ci siano due gruppi di corpi con proprietà molto diverse, vale a dire *isolanti* e *conduttori*. Nel caso degli isolanti, le cariche generate per strofinio rimangono in corrispondenza della zona strofinata e non si spostano lungo il materiale. Un isolante strofinato non viene scaricato col metterlo a contatto con il suolo. Nei conduttori, al contrario, le cariche generate per strofinio si distribuiscono immediatamente sull'intera superficie del conduttore. Se un conduttore carico entra in contatto con il suolo, esso si scarica subito, cedendo la sua carica elettrica alla terra.

La scoperta di questi due tipi di corpi e delle loro principali caratteristiche è avvenuta solo molto tardi nella storia dell'elettricità. Stephen Gray (1666-1736) fece questa grande scoperta nel 1729, pubblicando un lavoro fondamentale sull'argomento nel 1731[1]. Presentiamo qui alcuni aspetti della sua vita e del suo lavoro[2]. Egli fu autore di alcune delle più importanti pubblicazioni agli inizi della storia dell'elettricità[3].

Gray nacque nel 1666 a Canterbury, in Inghilterra. Non si è a conoscenza di alcun ritratto di Gray. Suo padre e suo fratello erano tintori di professione. Essi tingevano la stoffa durante la sua fabbricazione. Gray stesso lavorò come tintore, come ha affermato Heilbron[4]. Egli non studiò mai all'università. Era uno scienziato dilettante, che diede il suo contributo principalmente all'astronomia e all'elettricità. Probabilmente non si sposò mai. All'età di 53 anni, iniziò a vivere come pensionante alla Charterhouse, una casa di carità per capitani di mare in pensione e ragazzi poveri. Le persone che vi abitavano conducevano una vita semplice, con poche comodità, anche se non c'era il timore di morire di fame. Visse lì fino alla sua morte che avvenne a 70 anni di età.

Egli potrebbe avere studiato con il suo amico, l'Astronomo Reale John Flamsteed (1646-1719). Nel 1707 fu condotto a Cambridge da Roger Cotes (1682-1716). Gray fu eletto membro della Royal Society nel 1732. Grazie alle sue ricerche sull'elettricità, Gray fu il primo a ricevere la medaglia Copley della Royal Society per i risultati scientifici.

Il suo interesse per l'elettricità ebbe origine dagli articoli di Francis Hauksbee (nato intorno al 1666 e morto nel 1713), pubblicati nelle Philosophical Transactions dal 1704 al 1707. Hauksbee descrisse esperimenti con un tubo di vetro strofinato che, oltre ad attirare piccoli oggetti, emetteva anche della luce. Nel 1708 Gray inviò una lettera al segretario della Royal Society, Hans Sloane (1660-1753), descrivendo diversi esperimenti sull'elettricità. Questa lettera fu pubblicata solo nel 1954[5]. In essa descrisse diversi esperimenti analoghi a quelli di Guericke in cui una piuma è attratta da un vetro strofinato, lo tocca, e quindi ne viene respinta, come nell'Esperimento 4.4. Anche se non citò Guericke nelle sue opere, Gray potrebbe aver saputo dei suoi esperimenti[6]. Nel 1720 Gray pubblicò un documento che descriveva nuovi esperimenti sull'elettricità[7]. In questo lavoro egli descrisse una sorta di pendolo elettrico e nuovi materiali elettrici. Egli cioè scoprì nuovi oggetti che attraevano corpi leggeri se strofinati o che erano attratti dal legno o dal corpo umano quando venivano strofinati, come nell'Esperimento 3.10.

### B.1 Generatore elettrico di Gray

Le sue principali scoperte furono fatte tra il 1729 e il 1736, quando aveva tra i 63 e i 70 anni. Il lavoro principale che descrive la sua scoperta dei conduttori e degli isolanti fu pubblicato nel 1731[8]. Fino a quel momento nessuno aveva saputo fare in modo che i metalli attraessero corpi leggeri, anche dopo averli strofinati, riscaldati o lisciati. Questa è stata una delle più importanti scoperte di Grey: imparò a trasmettere la proprietà elettrica di attirare corpi leggeri ad un'ampia varietà di sostanze che fino ad allora nessuno era stato in grado di elettrizzare. Gray non elettrizzò i metalli per strofinio. Ma dimostrò che essi acquisiscono la proprietà di attrarre corpi leggeri quando sono connessi ad un tubo di vetro flint strofinato, o semplicemente avvicinando questo tubo al metallo.

Il suo documento inizia con le seguenti parole[9]:

> Nell'anno 1729 ho comunicato al Dr. Desaguliers, e ad alcuni altri gentiluomini, una scoperta che avevo allora fatto di recente, la quale mostrava che la virtù elettrica di un tubo di vetro poteva essere trasmessa ad altri corpi, in modo da donare loro la stessa proprietà di attrarre e respingere corpi leggeri posseduta dal tubo, quando eccitato per sfregamento; e che questa virtù attrattiva poteva essere trasmessa a corpi che erano a molti piedi di distanza dal tubo.

Il tubo di vetro cavo che egli utilizzava era di vetro flint, cioè un vetro pesante e brillante che contiene ossido di piombo. Egli strofinava il tubo con la mano nuda, come citato da lui nel suo documento del 1707-1708[10]:

> Il tubo di vetro che utilizzai aveva all'incirca le dimensioni di quello utilizzato dal Sig. Hauksbee, ma invece di strofinarlo con la carta come egli indicava, ho trovato che funzionava meglio quando lo strofinavo con la sola mano nuda.

Egli inoltre teneva il tubo di vetro strofinato in mano durante gli esperimenti. Siccome il tubo non si scaricava a contatto con le mani, ciò significa che esso si comportava come un ottimo isolante, contrariamente a quanto avviene con la maggior parte dei vetri moderni che si trovano in casa.

È normale che le nostre mani sudino a causa del calore sviluppato durante il processo di sfregamento. Il vetro può diventare umido durante questo processo, perdendo parte delle sue proprietà isolanti. Il vetro flint di Gray era un tubo cilindrico cavo di 1 m di lunghezza. La sua lunghezza può essere stata utile al mantenimento delle sue proprietà isolanti. Forse egli lo sfregava ad una sola estremità, tenendolo dall'altra parte. Ciò significa che a separare queste due regioni ci fosse una sufficiente quantità di vetro secco, con un conseguente ragionevole grado di isolamento.

Il tubo di vetro di Gray non era solo un ottimo isolante. Da quello che vedremo, esso riusciva a trasmettere il potere attrattivo a cavi conduttori molto lunghi. Il vetro toccava il cavo o era tenuto vicino ad un'estremità di questo, con l'altra estremità del cavo che attraeva una foglia di ottone. Ciò significa che egli era in grado di creare una forte polarizzazione del cavo a causa della grande quantità di carica nel suo tubo di vetro. Questo riusciva ad accumulare una grande quantità di cariche elettriche durante il processo di sfregamento.

Egli descrisse il tubo come segue[11]:

> Prima che io proceda agli esperimenti, può essere necessario dare una descrizione del tubo. La sua lunghezza è tre piedi e cinque pollici [1 m], con un diametro [esterno] di circa un pollice e due decimi [3 cm]. Riporto qui le dimensioni medie, essendo il tubo più largo a ciascuna estremità rispetto al centro. Il foro è circa un pollice [2,54

centimetri]. Ad ogni estremità ho messo un tappo di sughero per evitare che la polvere entrasse quando il tubo non era in uso.

Quest'ultima precauzione può essere stata motivata dagli esperimenti che Hauksbee aveva fatto che dimostravano che i contaminanti all'interno del tubo potevano ridurre la sua elettricità[12].

Questo tubo di vetro cavo strofinato con le mani era il suo generatore elettrico standard.

## B.2 La scoperta dell'elettrizzazione per comunicazione

Veniamo ora alla grande scoperta di Gray, realizzata nel febbraio 1729 (nostra enfasi in corsivo)[13]:

> Il primo esperimento che ho fatto, è stato quello di vedere se riuscivo a trovare qualche differenza nella sua attrazione, quando il tubo [strofinato] era chiuso a entrambe le estremità tramite i tappi, o quando era lasciato aperto, ma non sono riuscito a percepire alcuna differenza sensibile; ma tenendo una piuma sopra l'estremità superiore del tubo, ho scoperto che essa sarebbe andata verso il tappo, essendo attratta e respinta da esso, come avrebbe fatto col tubo quando esso veniva eccitato per sfregamento. Ho poi tenuto la piuma sopra l'estremità piatta del sughero, che la attrasse e respinse più volte consecutivamente; *al che fui molto sorpreso, e conclusi che c'era certamente una virtù attrattiva comunicata al tappo di sughero dal tubo eccitato.*

Egli aveva cioè strofinato solo il tubo di vetro, ma non il tappo. D'altra parte, osservava che la piuma era attratta e respinta dal sughero che era in contatto con il tubo. Fece un test e concluse che questo stava accadendo davvero, poiché il sughero attraeva non solo attraverso la sua superficie laterale, che era in contatto con il tubo, ma anche mediante la sua faccia piana che non era stata strofinata e che non era in contatto diretto con il vetro.

Poiché Gray non ha fornito alcun disegno nei suoi scritti, non è facile qui sapere esattamente il tipo di esperimento che effettuò. Noi immaginiamo tre possibilità.

a) Egli potrebbe aver tenuto in mano il calamo della piuma, con il calamo funzionante da isolante. Avrebbe quindi osservato la piuma flettersi, essere attratta e poi respinta dal sughero, toccando alternativamente tappo e mano. Le fibre della piuma avrebbero agito da conduttore, caricate tramite il meccanismo ACR e successivamente scaricate allorché toccavano la mano e questo processo si sarebbe ripetuto alcune volte (Figura B.1).

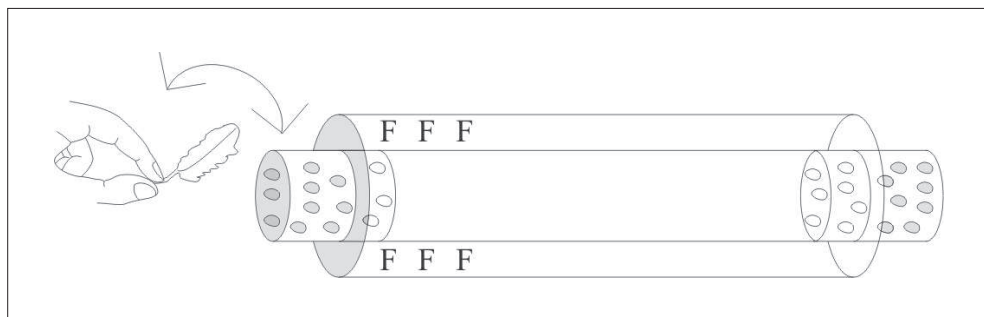



Figura B.1 Primo modo possibile in cui Gray può aver fatto la sua osservazione cruciale.

b) La piuma potrebbe essere stata legata ad un filo di seta, un isolante, muovendosi come un pendolo oscillante. Essa sarebbe stata dunque caricata a contatto con il sughero e scaricata a contatto con un conduttore nelle vicinanze, come la sua mano, un oggetto di legno o una parete (Figura B.2). Il verbo che egli usò nella sua descrizione era "tenere". Ciò suggerisce che egli tenne la piuma con la mano. Poiché la piuma era attratta e respinta più volte consecutivamente, questo suggerisce che la piuma stava tra il sughero e un conduttore (forse la mano di Gray, un muro, o un altro oggetto). Quando il tappo di sughero era elettrizzato o polarizzato dal tubo di vetro strofinato, esso attirava la piuma. Allorché la piuma toccava il sughero, acquistava una certa carica e veniva respinta dal tappo a causa del meccanismo ACR. La piuma poteva poi scaricarsi verso un altro conduttore nelle vicinanze. Dopo questa scarica, essa sarebbe stata ancora una volta attratta dal sughero elettrizzato o polarizzato e questo processo si sarebbe potuto ripetere alcune volte. Dunque, qualcosa di analogo a quanto osservato nell'Esperimento 4.15. Come abbiamo visto nella Sezione 4.6, nel 1720 Gray stesso aveva utilizzato un pendolo elettrico con una piuma legata ad un filo di seta[14].

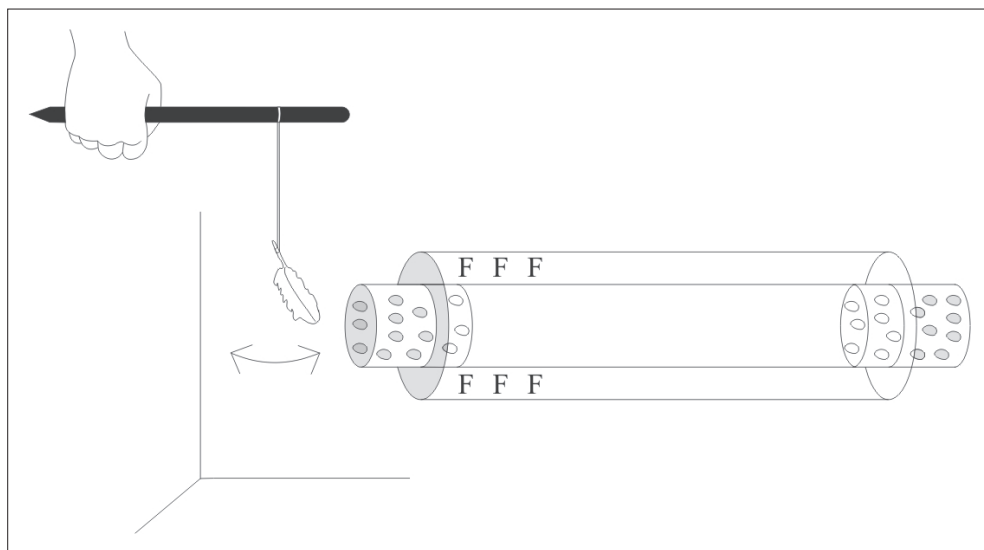



Figura B.2 Secondo modo possibile in cui Gray potrebbe aver eseguito la sua osservazione decisiva. In questo caso la piuma sarebbe stata attaccata ad un filo di seta, un isolante.

c) La terza possibilità è che l'esperimento fosse analogo a quello che Gray aveva effettuato nel 1708 e che abbiamo descritto nella Sezione 4.2. Cioè, che la piuma potrebbe essere stata rilasciata in aria sopra al tappo. Sarebbe poi stata attratta dal sughero all'estremità del vetro strofinato, sarebbe stata elettrizzata tramite il meccanismo ACR e quindi respinta dal sughero. Se la piuma si fosse mossa in prossimità di un altro conduttore presente nelle vicinanze (come la mano di Gray, un muro, o un altro conduttore), essa ne sarebbe stata attratta. Scaricata a contatto con questo, sarebbe poi stata attratta dal sughero elettrizzato o polarizzato. Tale processo si sarebbe potuto ripetere molte volte (Figura B.3).

Questa terza possibilità ci sembra la più probabile. Il verbo "tenere" era già stato utilizzato da Gray nel suo secondo esperimento del 1708 descritto nella Sezione 4.1. In quel caso, dopo che la piuma era stata lasciata andare dalle dita ed era stata attratta dal tubo di vetro strofinato, se fosse stata tenuta a breve distanza da un oggetto, essa

avrebbe oscillato tra l'oggetto e il vetro. Noi riteniamo che questo esperimento del 1729 sia analogo all'esperimento descritto nella Figura 4.11. La differenza è che ora la piuma oscillerebbe tra il sughero e un corpo vicino, con il tappo connesso al tubo di vetro strofinato, anche se il tappo stesso non fosse stato strofinato.

Non è nemmeno chiaro se il tubo di vetro strofinato fosse verticale o orizzontale. Anche per un tubo orizzontale, si può parlare della sua "estremità superiore" nel senso della porzione vicina all'estremità strofinata che era più lontana dalla superficie della Terra, mentre l'estremità inferiore sarebbe stata la parte vicina all'estremità strofinata che era più vicina alla superficie terrestre. Può anche essere che in parte dell'esperimento il tubo fosse verticale, mentre in un altro momento esso fosse orizzontale.

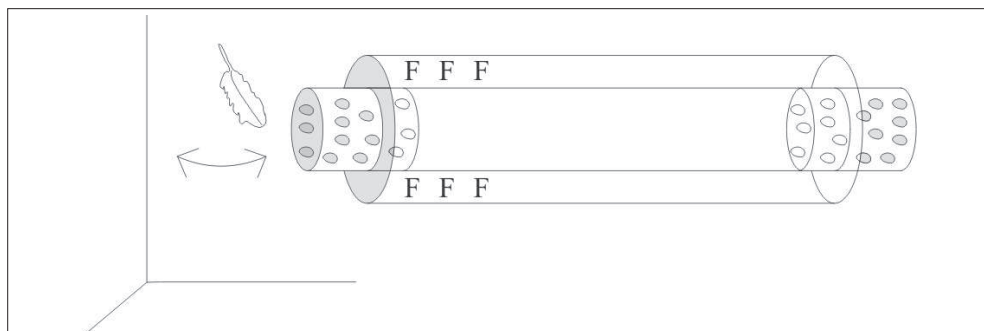



Figura B.3 Terzo modo possibile in cui Gray potrebbe aver eseguito la sua osservazione decisiva. La piuma avrebbe oscillato in aria tra il sughero e un altro corpo nelle vicinanze.

Anche se questa fu una scoperta casuale (parole sue) "*per la quale fui molto sorpreso*", Gray in realtà si aspettava che l'elettricità potesse essere trasmessa ad altri corpi. Egli aveva eseguito esperimenti precedenti in cui aveva osservato della luce emessa da corpi strofinati che andava verso altri corpi che non erano stati strofinati, proprio quando questi corpi non strofinati erano portati nei pressi di quelli strofinati. Poco prima di descrivere l'esperimento precedente della piuma e del sughero, Gray disse quanto segue nel suo documento del 1731[15]:

> Decisi quindi di procurarmi un grande tubo di vetro flint, per vedere se potessi fare qualche ulteriore scoperta con esso, dopo essermi ricordato di un sospetto che ebbi alcuni anni fa, e cioè che siccome il tubo trasmetteva una luce ai corpi, quando era sottoposto a sfregamento al buio, se non potesse nello stesso tempo comunicare l'elettricità ad essi, anche se non avevo eseguito mai fino a quel momento l'esperimento, non immaginando che il tubo potesse avere una così grande e meravigliosa influenza, da fare in modo che tali corpi attirassero con tanta forza o che l'attrazione si sarebbe protratta a tali distanze prodigiose, come si vedrà nel seguito di questo discorso.

L'importanza di questa scoperta è che il tappo si comporta come un conduttore, come abbiamo visto nelle Sottosezioni 6.3.1 e 6.3.2. Per questo motivo non è possibile caricarlo per strofinio mentre lo si tiene con la mano. Cioè, ogni carica che potrebbe avere acquisito per strofinio sarebbe immediatamente scaricata attraverso il nostro corpo. Per questo motivo, fino ad allora nessuno era riuscito a fare in modo che tappi, metalli, ecc. attirassero corpi leggeri dopo essere stati strofinati, come invece si otteneva facilmente nel caso dell'ambra o del vetro flint. Fu il particolare della piuma attratta dal sughero a catturare l'attenzione di Gray. Questa osservazione gli indicò che egli avrebbe potuto in qualche modo trasmettere la virtù elettrica al sughero, che era classificato come materiale non elettrico. Questa è stata la prima scoperta fondamentale

di Gray in questo articolo: comunicare l'elettricità ad un altro corpo (come il sughero) senza sfregarlo.

L'interpretazione moderna o la descrizione microscopica della "virtù attrattiva" che Gray riuscì a trasmettere al tappo, è che esso diventava polarizzato, come nell'Esperimento 7.9. Questo è illustrato nella Figura B.4.

Figura B.4 Polarizzazione del sughero conduttore a causa del vetro strofinato. La piuma conduttrice era attratta dalle cariche distribuite sulla superficie esterna del tappo.

In altre parole, il tubo di vetro isolante era stato caricato per strofinio. Il sughero conduttore attaccato al vetro strofinato si polarizzava. La superficie del sughero interna al tubo acquisiva una carica di segno opposto al tubo strofinato. La sua superficie esterna invece acquisiva una carica dello stesso segno di quella del tubo strofinato. La piuma conduttrice vicina era dunque attratta da queste cariche esterne.

## B.3 Esplorare gli aspetti della sua scoperta e risvegliare l'elettricità nascosta dei metalli

Dopo questa scoperta casuale, Gray continuò i suoi esperimenti[16]. Cominciò a determinare in modo sistematico a quali corpi poteva comunicare "elettricità" o la "virtù attrattiva". Egli voleva anche sapere a quale distanza poter trasmettere queste proprietà. Egli infisse un bastoncino di legno lungo 10 cm nel foro praticato in una sfera di avorio del diametro di 3,3 cm. L'altra estremità del bastoncino era inserita nel tappo, a sua volta incastrato nel tubo di vetro. Quando strofinò il tubo, egli osservò che la sfera attirava e respingeva la piuma più vigorosamente di quanto facesse il sughero (Figura B.5). Aumentò la lunghezza del bastoncino a 20 cm e più tardi a 60 cm e constatò che l'attrazione continuava ad essere osservata. Sostituì il bastone di legno con cavi di ferro e di ottone, osservando gli stessi effetti.

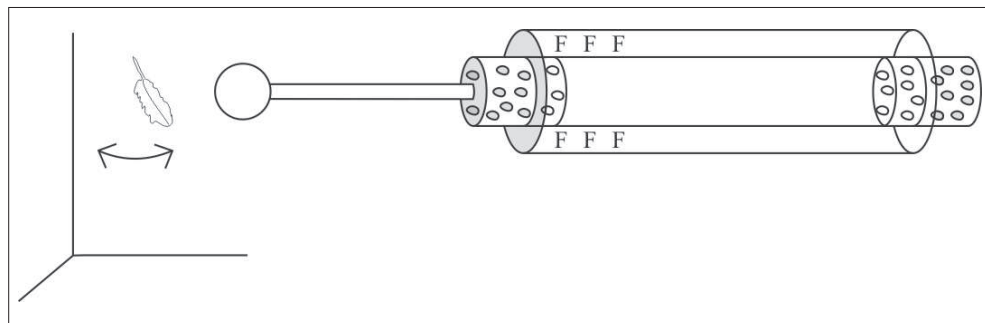



Figura B.5 L'inizio degli esperimenti sistematici di Gray.

In seguito, aumentò la lunghezza dei cavi fino a 90 cm, ma a quel punto egli dovette avere a che fare con molte vibrazioni. Causati dallo sfregamento del tubo, questi tremolii rendevano le attrazioni difficilmente osservabili. Egli allora appese la sfera al tubo tramite uno spago, una specie di corda robusta utilizzata per il confezionamento dei pacchi[17]. Quando strofinò il tubo, questa sfera attrasse e respinse una foglia di ottone posta

sotto di essa. Lo stesso avvenne allorché attaccò allo spago una sfera di sughero e poi una sfera di ferro di 570 g (Figura B.6 (a)). La Figura B.6 (b) è una rappresentazione qualitativa delle cariche presenti sul tubo isolante, insieme alla polarizzazione dello spago e della sfera ad esso attaccata. Lo spago e la sfera sono conduttori.

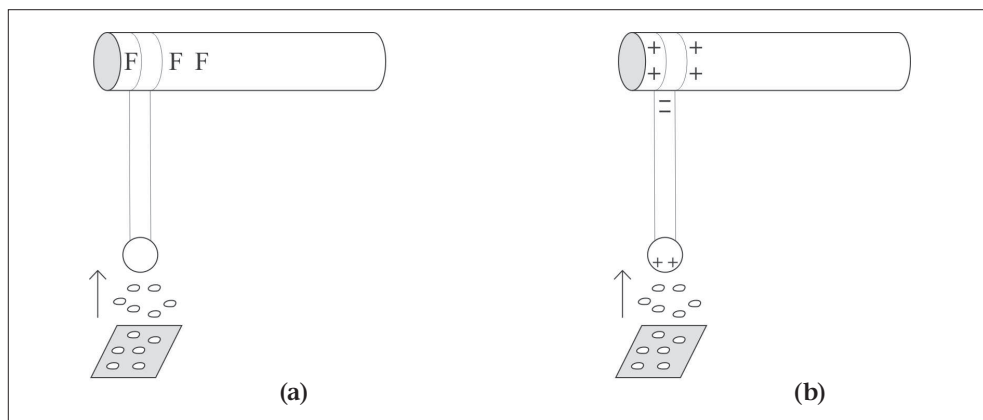



Figura B.6 **(a)** Quando Gray strofinò il tubo di vetro, egli osservò l'attrazione della foglia di ottone leggera da parte dei corpi sospesi all'estremità inferiore di uno spago annodato al tubo. Il corpo attraente poteva anche essere di metallo. **(b)** Rappresentazione qualitativa delle cariche sul vetro, insieme alla polarizzazione dello spago e della sfera attaccata.

Seguendo queste procedure, egli fu in grado di comunicare l'elettricità del tubo strofinato a diversi corpi ad esso collegati con stringhe o spaghi, ad esempio monete, una paletta per camino, una teiera di rame vuota o piena di acqua, un boccale d'argento, ecc.. Secondo le sue parole[18], tutti questi corpi "erano fortemente elettrici, attirando la foglia in ottone all'altezza di diversi pollici". Qualcuno era finalmente riuscito a fare in modo che i metalli attraessero corpi leggeri. Nessuno era stato in grado di ottenere questo effetto nei 2000 anni dalla scoperta dell'elettricità! Come disse Heilbron[19], "[...] e così Gray riuscì finalmente a risvegliare la loro elettricità nascosta".

## B.4 Gray scopre conduttori ed isolanti

Egli continuò la sua attività di ricerca e con questa tecnica elettrizzò (o piuttosto polarizzò) selce, magnetite, diverse sostanze vegetali, ecc.. La foglia di ottone poté essere attratta fino ad un'altezza di 10 cm. Dopo questi esperimenti, egli lavorò nuovamente con bastoncini orizzontali attaccati al tubo di vetro. Nel tubo egli inserì canne da pesca di 80 cm di lunghezza. Anche queste aste trasmettevano l'elettricità, sia che esse fossero cave o piene. Utilizzando bastoncini e canne da pesca, con una sfera di sughero all'estremità, egli fu in grado di osservare l'effetto anche a 5,5 m di distanza. Nel maggio del 1729 egli continuò i suoi esperimenti, ottenendo risultati positivi con un palo di legno lungo 7,3 m connesso al tubo di vetro. Anche a questa grande distanza una sfera di sughero posta alla fine del palo attirava una foglia di ottone quando il tubo era strofinato. Egli estese questa lunghezza fino a 9,7 m, incluso il tubo. Ma ancora una volta le vibrazioni causate dallo strofinamento del tubo disturbavano l'esperimento. Decise allora di attaccare di nuovo al tubo uno spago per reggere una sfera di sughero o di avorio. Quando Gray strofinò il tubo, poté fare in modo che la sfera attirasse la foglia di ottone perfino quando lo spago usato era lungo 8 m ed era stato sospeso da lui al di fuori di un balcone. Egli poi mise insieme un lungo bastone di legno orizzontale connesso al tubo con uno filo verticale attaccato all'altra estremità del

bastone, avente una pallina di avorio all'estremità inferiore, come se fosse una enorme canna da pesca. Inizialmente lavorò con un bastone di legno lungo 5,5 m ed un filo lungo 10,3 m. Quando strofinò il tubo di vetro, egli osservò che la pallina d'avorio attirava una foglia di ottone sotto di essa.

In seguito, egli cercò di aumentare la lunghezza orizzontale del suo dispositivo utilizzando solo dello spago. A tal scopo, egli prese uno spago e, dopo aver confezionato un cappio su ciascuna delle sue estremità, mediante uno di questi lo appese in verticale ad un chiodo conficcato in una trave. Fece poi passare un secondo spago attraverso l'altro cappio, quello inferiore, e lo legò al tubo di vetro. L'altra estremità di questo secondo spago era legata ad una sfera d'avorio. Se noi seguiamo questo secondo spago dalla palla di avorio al tubo di vetro nella successiva Figura B.7(a), lo si vede disposto in verticale, tra la sfera e l'estremità inferiore del primo spago, e in orizzontale tra questo cappio e il tubo. Sotto la palla d'avorio egli mise una foglia di ottone. Ciò fatto, quando strofinò il tubo di vetro, Gray non fu in grado di osservare la benché minima attrazione della foglia di ottone da parte della sfera d'avorio (Figura B.7 (a)).

Egli allora osservò[20]:

> Su questo [fatto] sono giunto alla conclusione che, quando la virtù elettrica è venuta [dal tubo di vetro strofinato] al cappio appeso alla trave, essa è andata lo stesso alla trave; così che niente, o molto poco di essa, almeno, è andata giù alla sfera, cosa che è stata poi verificata, come apparirà dagli esperimenti che verranno menzionati nel seguito.

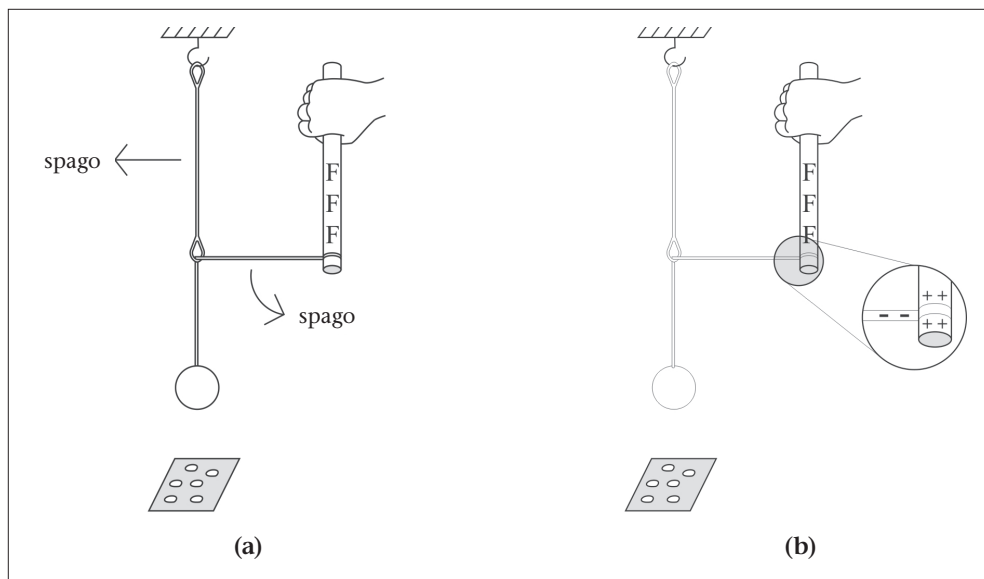



Figura B.7 **(a)** Quando il tubo di vetro viene strofinato, la palla di avorio non attira la foglia di ottone. In questa situazione, lo spago collegato al tubo e alla sfera è anche collegato ad un altro spago attaccato al soffitto. **(b)** Rappresentazione qualitativa delle cariche nel caso **(a)**.

Forniamo ora l'interpretazione moderna di questo esperimento. il tubo di vetro strofinato polarizza inizialmente lo spago conduttore. Ma in questo caso lo spago collegato al tubo lo è anche alla terra attraverso uno spago analogo. Quest'ultimo mette a terra lo spago collegato al vetro, in analogia a quanto visto nella Figura 7.30. Cioè, l'estremità dello spago in contatto con il vetro assume una carica di segno opposto al vetro. Le altre cariche che erano al fondo della sfera nella Figura B.6 (b) sono ora diffuse sulla

superficie della Terra a causa dell'avvenuta messa a terra. Nella Figura B.7 (b) si ha una descrizione qualitativa di questo esperimento in termini di cariche distribuite sul vetro e sullo spago. In questo caso non c'è nessuna carica risultante nella sfera e la sfera non è nemmeno polarizzata. Per tali motivi, la sfera non attrae le foglie di metallo collocate al di sotto di essa.

Nel luglio 1729 Gray decise di mostrare questi esperimenti al suo amico Granville Wheler (1701-1770). Gray aveva un tubo di vetro pieno lungo 28 cm con 2 cm di diametro. Essi attaccarono lo spago al tubo e, all'estremità inferiore dello spago, una sfera. Sotto la sfera misero la foglia di ottone. Ciò fatto, pur operando da una finestra, dove strofinarono il tubo di vetro, e con fili lunghi da 4,9 fino a 10,4 m riuscirono tuttavia a fare in modo che la sfera attirasse la foglia di ottone.

Gray continuò la sua descrizione degli esperimenti e poi presentò la sua più grande scoperta[21]:

> Siccome qui non avevamo altezze maggiori, il sig. Wheler desiderava vedere se non potevamo trasferire la virtù elettrica orizzontalmente. Allora gli parlai del tentativo che avevo fatto con quella configurazione, ma senza successo, dicendogli del metodo e dei materiali di cui avevo fatto uso, come menzionato sopra. Egli allora propose di usare un filo di seta per sostenere il filo [di comunicazione], attraverso il quale la virtù elettrica doveva passare. Io gli dissi che ciò poteva andar meglio a causa della sua piccolezza [cioè, Gray credeva che così la cosa potesse funzionare meglio rispetto al suo esperimento originale grazie al piccolo spessore del filo di seta in confronto con il maggiore spessore dello spago]; in modo che ci sarebbe stata meno virtù [elettrica] trasportata in esso dal filo di comunicazione, e con il quale, insieme con il metodo adatto che il sig. Wheler escogitò, e con i grandi sforzi che egli stesso fece, e l'assistenza dei suoi servitori, noi avemmo un successo ben oltre le nostre aspettative.
> Il primo esperimento fu fatto nella "Matted Gallery" il 2 Luglio 1729, circa alle dieci del mattino. A circa quattro piedi [1,2 m] dalla fine della Galleria c'era una linea trasversale che era stata fissata tramite le sue estremità ad ogni lato della stessa con due chiodi. La parte centrale della linea era di seta, il resto ad ogni estremità di spago. Poi la linea alla quale la sfera d'avorio era appesa e attraverso la quale la virtù elettrica doveva essere trasmessa dal tubo, che era lunga ottanta piedi e mezzo [24,5 m], fu messa sulla linea di seta trasversale, in modo che la sfera pendesse a circa nove piedi [2,7 m] sotto di essa. L'altra estremità della linea [di comunicazione] era attaccata con un anello alla canna di vetro, e la foglia di ottone tenuta sotto la sfera su un pezzo di carta bianca; quando il tubo veniva strofinato, la sfera attirava la foglia di ottone e la teneva sospesa per un po' di tempo.

Una rappresentazione di questo esperimento può essere trovata nella Figura B.8 (a). Uno spago è collegato ad un tubo di vetro e ad una palla d'avorio all'altra estremità. Sotto la sfera ci sono foglie di ottone. Questo spago ha una porzione orizzontale ed una verticale. Alla giunzione di queste due porzioni, è sostenuto da un filo di seta teso. Quando strofinò il vetro, Gray osservò la sfera attrarre la foglia di ottone sotto di essa. Questa attrazione, si badi, non avvenne per la situazione schematizzata nella Figura B.7, in cui la corda collegata al vetro era sospesa mediante un altro spago attaccato al soffitto.

Nella Figura B.8 (b) abbiamo una rappresentazione qualitativa delle cariche in questo esperimento. In questo caso, lo spago è supportato da un isolante, cioè, dal filo di seta. Qui non vi è alcuna messa a terra. La situazione è simile a quella della Figura B.6 (b).

Qui abbiamo la scoperta fondamentale dei conduttori e degli isolanti. Come conduttori abbiamo il sughero, la sfera d'avorio, il legno, lo spago, i fili metallici, ecc. Come

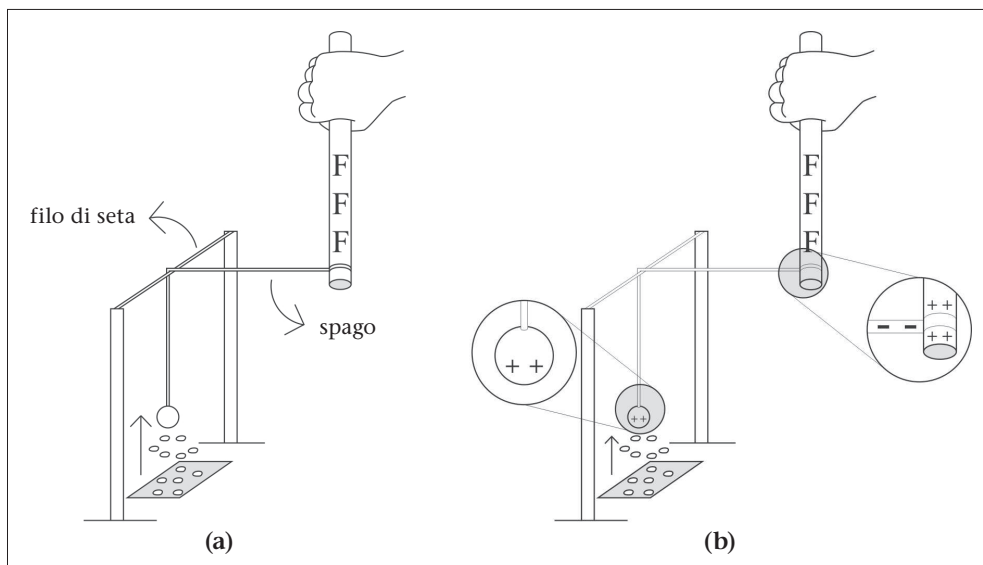



Figura B.8 **(a)** Gray osservò un'attrazione sulla foglia di ottone quando strofinò il tubo di vetro. In questa situazione lo spago attaccato al tubo di vetro strofinato era supportato da un filo di seta. **(b)** Rappresentazione qualitativa delle cariche nel caso **(a)**.

isolanti abbiamo il filo di seta. Gray poteva comunicare la virtù elettrica ai conduttori attraverso il contatto con un tubo di vetro strofinato. Il filo di seta, invece, non permette il passaggio e la dissipazione della virtù elettrica a terra. All'interno di questo stesso articolo Gray descrisse un altro isolante, cioè, le lenze da pesca in crine di cavallo[22]. In altri articoli dello stesso anno Gray menzionò altri isolanti, cioè, un disco di resina e il vetro riscaldato[23]. Egli era solito realizzare dischi di resina al fine di sostenere i corpi a cui voleva comunicare l'effluvio elettrico. In un documento del 1735 egli descrisse anche dischi di cera d'api, zolfo, e gommalacca[24]. Egli utilizzò tutti questi materiali come isolanti o, usando le sue parole, come *corpi elettrici*.

Prima di continuare queste citazioni, è importante ricordare il problema delle vecchie e nuove nomenclature discusse nella Sezione 8.1. Cioè, le sostanze che Gilbert classificò come *elettriche* sono chiamate *isolanti* al giorno d'oggi. Le sostanze che erano classificate come *non elettriche* sono ora chiamate *conduttori*.

Una rappresentazione di questo esperimento appare in Figura B.9[25].

Questa figura mostra Gray e il suo amico Wheler. Gray tiene in mano e sfrega il suo tubo di vetro lungo 1 m. Collegata al tubo vi è una stringa con una sfera d'avorio all'altra estremità. La sfera è vicina a terra, con piccoli pezzi di metallo sotto di essa. La stringa collegata al tubo di vetro è sostenuta da altre linee trasversali. Quando queste linee trasversali sono conduttrici, la sfera non attrae i pezzi di metallo.

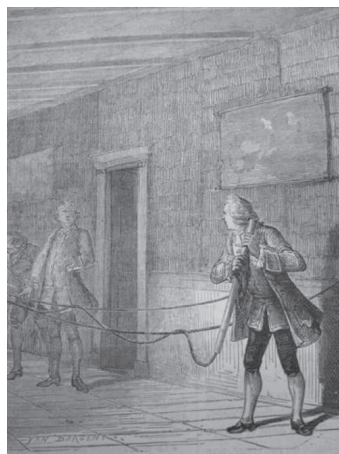



Figura B.9 Gray strofina il suo tubo di vetro flint lungo 1 m con le mani nude. Uno spago collegato al tubo è sostenuto da un filo di seta. Una sfera d'avorio collegata all'altra estremità dello spago attira la foglia d'ottone posta sotto di essa.

Al contrario, quando queste linee trasversali sono fatte di un materiale isolante come la seta, la sfera attrae i pezzi di metallo sotto di essa, quando Gray strofina il tubo di vetro.

Un'antica rappresentazione di questo esperimento cruciale fatto da Gray è riprodotta in Figura B.10[26].

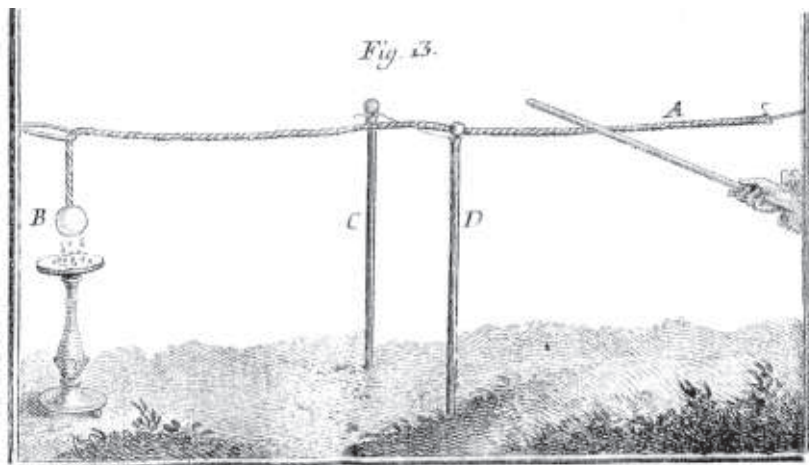



Figura B.10 Una sfera d'avorio attrae una foglia di ottone quando un tubo di vetro strofinato tocca uno spago orizzontale o quando il tubo è portato vicino ad esso, purché lo spago sia sostenuto da fili di seta.

Una rappresentazione interessante dell'esperimento di Gray appare nel libro di Doppelmayr (Figura B.11)[27].

Questa è la seconda scoperta fondamentale descritta da Gray in questo articolo, vale a dire, l'esistenza di conduttori e isolanti.

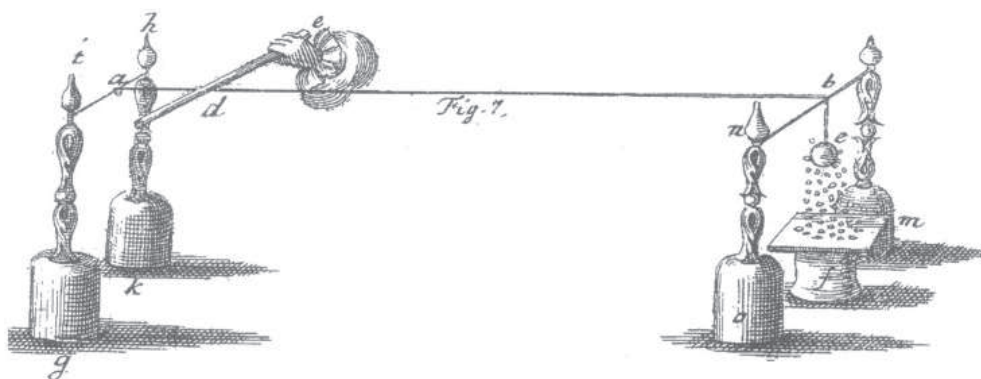



Figura B.11 Un tubo di vetro strofinato tocca una corda orizzontale e la sfera attira corpi leggeri. La corda è sostenuta da stringhe isolanti.

## B.5 Scoperta che il comportamento di un corpo come conduttore o come isolante dipende dalle sue proprietà intrinseche

Dopo questi esperimenti, Gray e Wheler riuscirono a trasmettere la virtù elettrica in orizzontale fino a 45 m di distanza, curvando a volte lo spago, cioè la linea di trasporto. In seguito raggiunsero 34 m lungo una linea retta orizzontale, sommata a 4 m in verticale. Un altro giorno raggiunsero una distanza di 89 m con un filo orizzontale mediante

alcune curvature, aiutandosi sempre con fili di seta. Quando cercarono di aumentare ulteriormente questa lunghezza, il filo di seta si ruppe. Non riusciva a sopportare il peso dello spago e le vibrazioni causate dallo sfregamento del tubo di vetro.

Poi venne la terza scoperta fondamentale di Gray, descritta in questo articolo (nostra enfasi in corsivo)[28]:

> A tal proposito, avendo portato con me sia del filo d'ottone che di ferro, invece della seta usammo del filo di ferro sottile; ma questo era troppo debole per sopportare il peso della linea [di comunicazione]. Prendemmo poi del filo in ottone di una dimensione [spessore] leggermente più grande di quella del ferro. Quest'ultimo sostenne la nostra linea di comunicazione; ma sebbene il tubo [di vetro] fosse ben strofinato, non c'era il minimo movimento o attrazione [della foglia di ottone] data dalla sfera, neanche con il tubo grande [di vetro lungo 1 m], di cui facemmo uso quando trovammo che la canna piccola piena [di vetro lunga 28 cm] era inefficace: *in tal modo ci eravamo allora convinti che il successo che avevamo avuto prima dipendeva dai fili che sostenevano la linea di comunicazione, che erano di seta, e non dal loro essere piccoli [sottili], come prima avevo immaginato che potesse essere;* lo stesso effetto si verificò qui come fece quando la linea che deve trasmettere la virtù elettrica è sostenuta da spago; cioè che quando gli effluvi [elettrici] arrivano al filo o allo spago che supporta la linea [di comunicazione], essi passano tramite loro al legno, al quale ciascuna loro estremità è fissata, e quindi non avanzano più lungo la linea che serve a portarli alla pallina d'avorio.

Gray aveva già scoperto come comunicare la virtù elettrica a legno, metalli e diverse altri materiali. Aveva anche scoperto che un filo di seta impediva che l'elettricità si perdesse attraverso di esso. Tuttavia, inizialmente egli credeva che questa proprietà isolante fosse dovuta al piccolo spessore del filo di seta, se confrontato col maggiore spessore di uno spago. Con tale esperimento, d'altra parte, egli scoprì che due fili sottili incrociati aventi quasi lo stesso spessore, uno di metallo e l'altro di seta, esibivano un comportamento completamente diverso. Mentre il filo metallico (o lo spago) consentiva il passaggio a terra della virtù elettrica, il filo di seta non consentiva che l'elettricità vi fluisse per suo tramite. Questo significava che nei suoi esperimenti era essenzialmente il genere di materiale a definire o a caratterizzare la proprietà esibita. Le dimensioni o gli spessori dei materiali nei suoi esperimenti non erano così rilevanti nel determinare se il loro comportamento sarebbe stato quello di conduttori o di isolanti, contrariamente a quello che aveva pensato inizialmente. Questa fu la sua terza scoperta fondamentale.

## B.6 Scoperta che l'elettrizzazione per comunicazione avviene a distanza

Essi proseguirono con i loro esperimenti, trasmettendo elettricità fino a 203 m, mediante uno spago zigzagante con otto ritorni, sorretto da filo di seta. Una rappresentazione di questo esperimento appare nelle Figure B.12 e B.13[29].

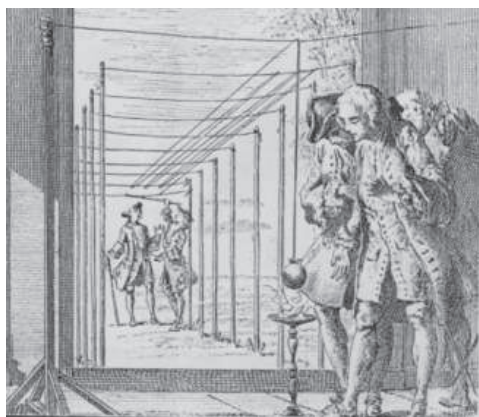



Figura B.12 Una rappresentazione dell'esperimento di Gray.

Essi estesero l'esperimento a 198 m in linea retta,in seguito a 233 m e, negli esperimenti successivi, variarono gli oggetti sospesi all'estremità libera dello spago. Invece di una sfera d'avorio, essi usarono un mappamondo con una superficie di 8 m$^2$, un ombrello e una calamita con una chiave metallica che pendeva da una delle sue estremità.

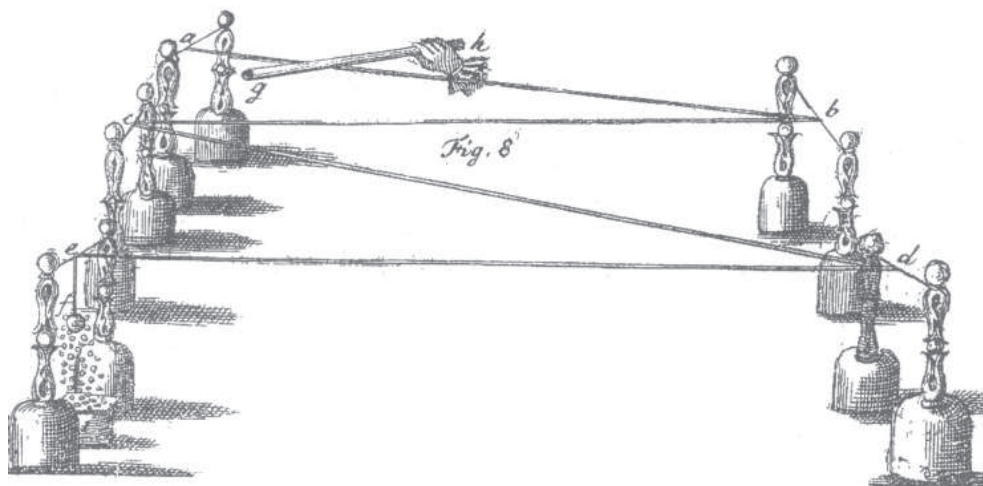



Figura B.13 Una sfera attira corpi leggeri se sostenuta da stringhe isolanti. Il vetro strofinato è avvicinato all'altra estremità del cavo conduttore.

Tutti questi materiali attiravano la foglia di ottone quando il tubo di vetro veniva strofinato. Dopo, essi sospesero tre corpi in posizioni diverse lungo la linea di comunicazione ed osservarono che tutti e tre simultaneamente attraevano le rispettive foglie d'ottone quando il vetro veniva strofinato. Sospesero, dalle zampe, finanche un pulcino vivo e osservarono che il suo petto divenne fortemente attrattivo.

Alla fine dell'articolo, Gray descrisse altri esperimenti mostrando di poter trasmettere la virtù elettrica fino a una distanza di 270 m.

A quel punto troviamo la quarta importante scoperta descritta da Gray in questo articolo. Egli dimostrò che la virtù elettrica avrebbe potuto esser trasmessa lungo la linea di comunicazione, semplicemente portando un tubo di vetro strofinato vicino a una sua estremità, senza alcun contatto tra tubo e spago[30]:

> *A casa del sig. Godfrey ho effettuato i seguenti esperimenti; dimostrando che la virtù elettrica può essere trasferita dal tubo, senza toccare la linea di comunicazione, ma solo tenendo il tubo vicino ad essa.*
> Il primo di questi esperimenti fu compiuto il 5 agosto 1729.
> [...]
> Presi un pezzo di *hair-line*[31], come quello su cui viene messa ad asciugare la biancheria, di circa undici piedi [3,3 m] di lunghezza; che, tramite un anello all'estremità superiore di esso, era stato sospeso a un chiodo conficcato in una delle travi nel sottotetto e aveva alla sua estremità inferiore un peso di piombo di quattordici libbre [6,4 kg], appeso ad essa attraverso un anello di ferro. In seguito la foglia in ottone fu posta sotto il peso, e il tubo strofinato, e tenendolo vicino al filo senza toccarlo, il peso di piombo attrasse e respinse la foglia d'ottone diverse volte consecutivamente, da un'altezza di almeno tre, se non quattro pollici [10 cm]. Se il tubo era tenuto a tre o quattro piedi

[1,2 m] sopra il peso, si verificava un'attrazione; ma se fosse stato tenuto più in alto, in modo da essere vicino alla trave a cui il peso era sospeso attraverso l'*hair-line*, non ci sarebbe stata alcuna attrazione.

Una rappresentazione di questo esperimento può essere trovata nella Figura B.14 (a).

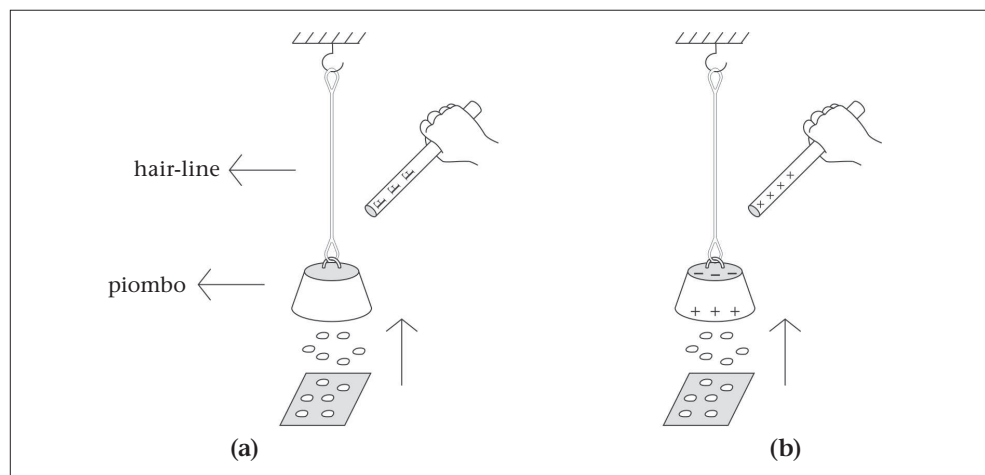



Figura B.14 **(a)** Gray riuscì a far sì che il peso di metallo attirasse corpi leggeri semplicemente avvicinando ad esso il vetro strofinato, senza toccarlo. **(b)** Rappresentazione qualitativa delle cariche nel caso **(a)**.

La nostra comprensione attuale di questo esperimento è che il tubo di vetro strofinato polarizza elettricamente il peso di piombo. La porzione del peso che è vicina al vetro si elettrizza con una carica di segno opposto al vetro, mentre la porzione più lontana si elettrizza con una carica dello stesso segno di quella del vetro. La foglia di ottone viene attratta essenzialmente dalla porzione inferiore del piombo polarizzata. In un certo senso questo è analogo all'Esperimento 7.9.

Una rappresentazione qualitativa delle cariche in questo esperimento appare nella Figura B.14 (b).

Gray utilizzò *hair-lines* per sospendere corpi anche in altri esperimenti. Non è chiaro esattamente in cosa essi consistessero. In ogni caso, essi fungevano da isolanti. In un altro famoso esperimento descritto in questo articolo del 1731, Gray sospese un ragazzo di 21 kg in posizione orizzontale[32], "tramite due *hair-lines*, come quelli su cui vengono messi ad asciugare i vestiti". Portò poi un tubo di vetro strofinato vicino ai piedi del ragazzo, senza toccarli, e osservò che il volto del ragazzo attraeva foglie di ottone poste sotto di lui.

Du Fay ripeté l'esperimento con il ragazzo nel 1733. Quando usò corde comuni ("cordes ordinaires"), egli non ottenne alcuna attrazione. Però, quando sostituì le corde comuni con corde di seta ("cordons de soye"), osservò le stesse attrazioni ottenute da Gray[33]. Le corde comuni sono di solito conduttrici. Questo dimostra che gli *hair-lines* di Gray sono isolanti, poiché solo quando usiamo isolanti, gli esperimenti con il ragazzo hanno successo.

In un articolo del 1735 Gray eseguì alcuni esperimenti simili. Iniziò dicendo che[34]

Siccome non avevo alcuna corda di seta abbastanza forte da sorreggere il ragazzo, io lo feci stare su alcuni corpi elettrici.

Cioè, il ragazzo si mise su alcuni isolanti, come diremmo oggi. Nella pagina successiva di questo articolo, Gray descrisse altri esperimenti che compì a casa del sig. Wheler: “Il sig. Wheler, subito dopo che venni da lui, si procurò stringhe di seta abbastanza forti da sopportare il peso del suo valletto, un bravo ragazzo robusto; poi lo si sospese sulle stringhe, [...]”. Da tutto ciò è molto probabile che gli *hair-lines* di Gray fossero di seta.

Nel seguito di questo articolo, Gray descrisse altri esperimenti in cui egli trasmetteva la virtù elettrica a conduttori semplicemente portando il tubo di vetro strofinato in prossimità dei conduttori, senza toccare gli stessi. Utilizzando cerchi di legno di 66 cm e 91 cm di diametro, sospesi da stringhe isolanti, egli osservò che l’effluvio elettrico poteva essere trasportato lungo la circonferenza di questi cerchi. Esso era anche in grado di passare da un cerchio ad un altro in contatto con il primo (Figura B.15)[35]. Egli riusciva anche a trasmettere la virtù elettrica a frutta e verdure.

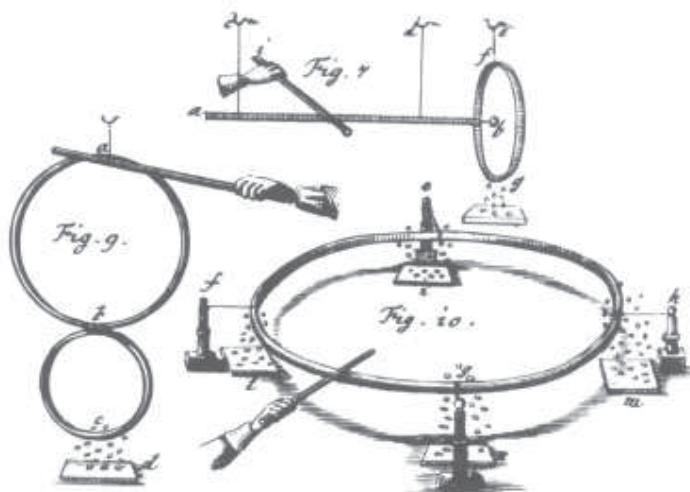



Figura B.15 Rappresentazione degli esperimenti di Gray con i cerchi di legno sorretti da stringhe isolanti.

Gray fu persino capace di fare in modo che una bolla di sapone attirasse corpi leggeri[36]:

> Il 23 marzo [del 1730], sciolsi il sapone nell’acqua del Tamigi, quindi sospesi una pipa per tabacco tramite un *hair-line* [probabilmente di seta o un crine di cavallo], in modo che essa fosse sospesa quasi in orizzontale, con la bocca del fornello verso il basso. Poi dopo averla immersa nel liquido saponato, e soffiata una bolla, con l’ottone in foglioline giacente su un supporto sotto di essa, avendo strofinato il tubo [di vetro], l’ottone fu attratto dalla bolla, quando il tubo fu tenuto vicino all’*hair-line*. Poi ripetei l’esperimento con un’altra bolla, tenendo il tubo in prossimità dell’estremità piccola della pipa, e l’attrazione era ora molto più grande, essendo l’ottone in foglioline attratto all’altezza di circa due pollici [5 cm].

Questo esperimento, rappresentato nella Figura B.16 (a), illustra ancora una volta che l’acqua dolce si comporta come un conduttore. Gray aveva già trasmesso la capacità di attirare corpi leggeri a molti conduttori, come metalli, legno, ecc.

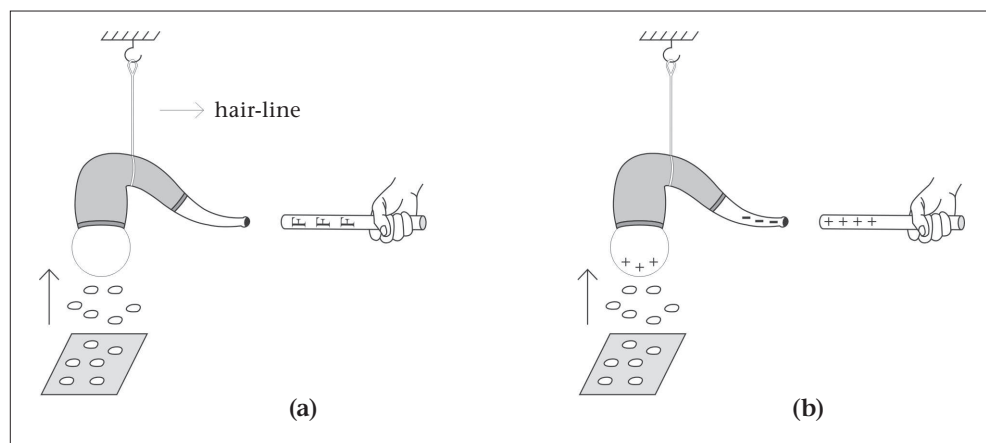



Figura B.16 (**a**) una bolla di sapone che attrae foglie d'ottone quando il tubo di vetro strofinato viene portato in prossimità della pipa sospesa tramite un *hair-line* [filo di crine o filo setoso], un isolante. (**b**) Rappresentazione qualitativa delle cariche nel caso (**a**).

## B.7 L'esperimento con il ragazzo sospeso

In questo lavoro del 1731 Gray descrisse diversi esperimenti in cui egli sospese un ragazzo in posizione orizzontale mediante *hair-line*, probabilmente fatti di seta[37]. Ad esempio, con la faccia del ragazzo rivolta verso il basso, Gray tenne il tubo di vetro strofinato vicino ai suoi piedi, senza toccarli, e osservò foglie di ottone che erano attratte dal volto del ragazzo, sollevandosi fino a 30 cm di altezza. Una vecchia rappresentazione di questo esperimento può essere trovata in Figura B.17[38].

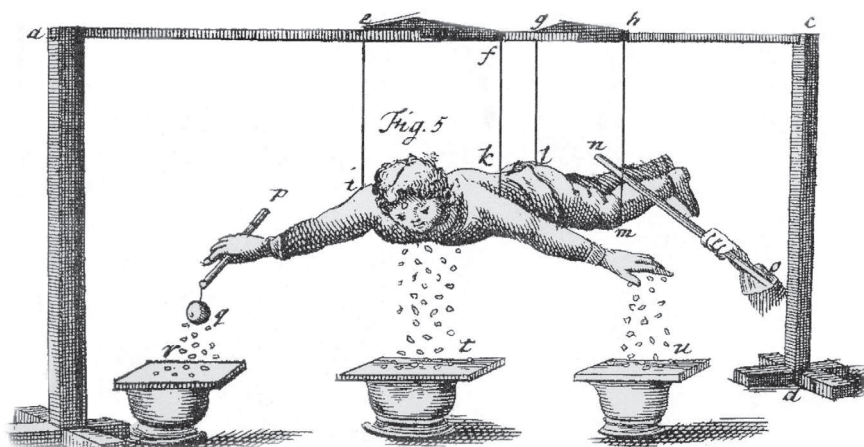



Figura B.17 Un ragazzo è sospeso mediante fili isolanti. Un tubo di vetro strofinato è portato vicino alle sue gambe. Le mani e il viso del ragazzo attraggono corpi leggeri.

Questo esperimento diventò molto famoso. Esso fu usato da Nollet nel frontespizio del suo libro *Essai sur l'Electricité des Corps* (Figura B.18) [39].

Figura B.18 Rappresentazione del famoso esperimento di Gray nel libro di Nollet, [Nol53]. In questa figura si può notare che il tubo di vetro non deve necessariamente toccare il ragazzo.

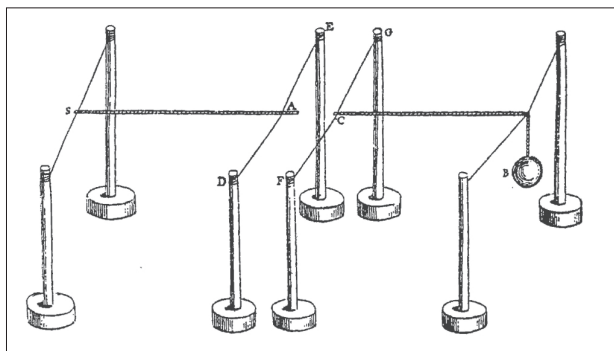



Figura B.19 Illustrazione dell'esperimento di Du Fay analogo ad alcuni precedenti esperimenti compiuti da Gray.

Alcuni di questi esperimenti furono ripetuti da Gray ed estesi da Du Fay. Per esempio, nella sua terza memoria egli ha un esperimento che è qui illustrato in Figura B.19 [40].

Du Fay descrive tale esperimento come segue[41,42]:

> Presi due pezzi di corda [conduttrice], con lo spessore di un dito, di cui il primo [pezzo] *SA*, aveva una lunghezza di 6 piedi [1,8 m], e l'altro *CB* era 8 [piedi, cioè 2,4 m], fissai ognuno di loro da una estremità a due cavi di seta trasversali, *DE* e *FG*, ad angolo retto rispetto a loro, e che erano disposti in modo tale che noi potessimo avvicinare o allontanare parallelamente fra loro tali cordicelle trasversali, in modo che potessimo tenerli alla distanza prescelta [tra loro]. All'estremità *B* della corda da 8 piedi fu sospesa una sfera di legno, mentre l'estremità lontana della corda da 6 piedi fu fissata in *S* ad un terzo filo di seta trasversale per sospenderla in aria. Poi, avvicinando il tubo strofinato [di vetro] all'estremità *S* della corda *SA*, dopo aver separato le due corde di un pollice [2,54 cm] l'una dall'altra, l'elettricità era così sensibile in prossimità della sfera come se la corda fosse stata continua [osservando che la sfera attirava foglie metalliche poste vicino ad essa], a [una separazione di] 3 pollici [7,5 cm] essa [l'elettricità] era ancora più [sensibile], a 6 pollici [15 cm] un po' meno, e ad 1 piede [30 cm] molto meno, più o meno come a una distanza di 1256 piedi di una linea continua [377 m come Du Fay aveva sperimentato in precedenza]. Pertanto, la sostanza elettrica scorreva liberamente attraverso l'aria, senza rimanere attaccata ad un qualsiasi corpo. Questo esperimento dimostra quanto sia necessario che la corda [conduttrice] utilizzata per trasmettere lontano l'elettricità, sia *isolata*, cioè, [la corda conduttrice dovrebbe essere] sospesa soltanto da corpi che sono il meno possibile propensi a caricarsi di elettricità.

La descrizione moderna di questo esperimento non si basa su una sostanza elettrica che fluisce liberamente attraverso l'aria, come immaginava Du Fay. Si ritiene, invece, che il fenomeno principale di questo esperimento sia la polarizzazione elettrica dei conduttori, come in Figura B.20. Cioè, il tubo di vetro strofinato polarizza elettricamente la corda conduttiva *SA* quando viene portato vicino ad essa. Le cariche all'estremità *A* di detta corda polarizzano elettricamente un altro conduttore *CB*. Questo conduttore *CB* è costituito da una seconda corda collegata ad una palla di legno. Entrambe le polarizzazioni avvengono nonostante lo spazio d'aria tra *A* e *C*, che varia da un pollice, 2,5 cm, ad un piede, 30 cm. Le cariche accumulate in corrispondenza dell'estremità inferiore della sfera di legno, che hanno lo stesso segno delle cariche sul tubo di vetro strofinato, attraggono corpi leggeri nelle vicinanze.

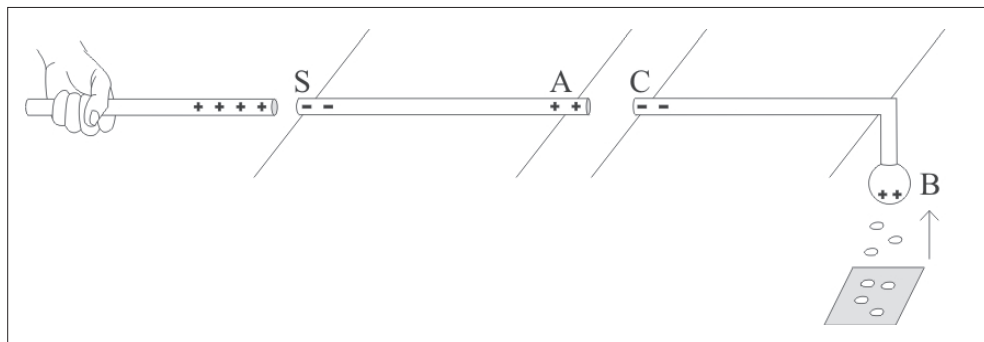



Figura B.20 Illustrazione della polarizzazione dell'esperimento di Du Fay (Figura B.19). I conduttori *SA* e *CB* sono sorretti da fili isolanti di seta.

## B.8 Scoperta che le cariche libere sono distribuite sulla superficie di conduttori

Nel seguito dell'articolo di Gray del 1731, egli descrisse un'altra scoperta fondamentale, vale a dire (nostra enfasi in corsivo)[43]:

> *Qualche tempo dopo, a casa del sig. Wheler facemmo il seguente esperimento, per provare se l'attrazione elettrica fosse proporzionale alla quantità di materia nei corpi.*
> Furono fatti due cubi di quercia, di circa sei pollici quadrati [15 cm$^2$], uno pieno, l'altro cavo: questi furono sospesi con due *hair-line*, quasi allo stesso modo come nell'esperimento sopra citato; la distanza dei cubi l'uno dall'altro, era stimata essere di circa quattordici o quindici piedi [4,6 m]; la linea di comunicazione era legata ad ogni *hair-line*, e l'ottone in foglie posto sotto i cubi, il tubo [di vetro] era strofinato e tenuto sopra la metà della linea [di comunicazione], e come meglio potesse essere stimato, a parità di distanza dai cubi, e allora entrambi attrassero e respinsero le foglie di ottone allo stesso tempo, e alla stessa altezza*; in modo che sembrava non esserci maggiore attrazione da parte del cubo pieno rispetto al cubo cavo; tuttavia sono incline a pensare che gli effluvi elettrici passino attraverso tutte le parti interne del cubo pieno, sebbene nessuna parte attragga al di fuori della superficie;* perché da diversi esperimenti risulta che se un corpo solido tocca ciò che attira, la sua attrazione cessa finché quel corpo non sia rimosso, e l'altro sia nuovamente eccitato dal tubo.

Una rappresentazione di questo esperimento può essere trovata in Figura B.21.

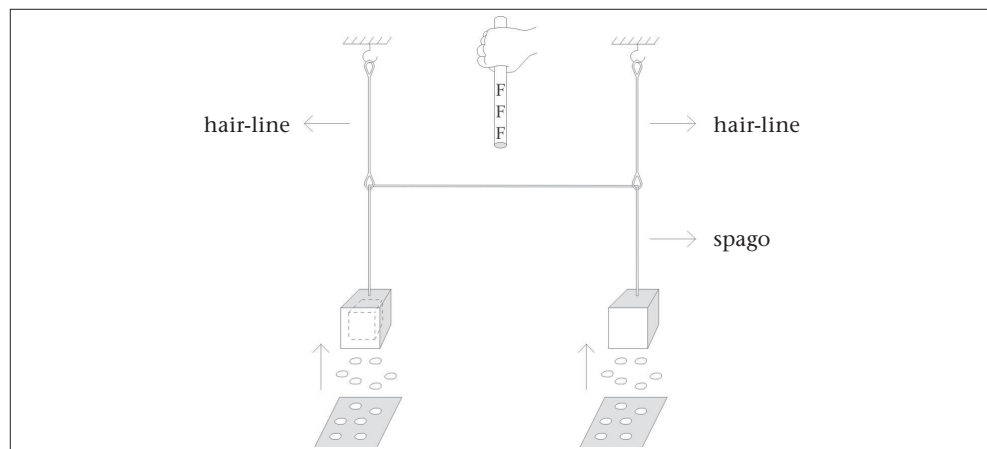



Figura B.21 Un cubo cavo e un cubo pieno attraggono con la stessa forza.

Questo esperimento descrive due scoperte molto importanti. La prima è che in elettrostatica le cariche libere o le cariche in eccesso sui conduttori (come i cubi conduttori di legno in questo esperimento) si distribuiscono sulle superfici dei conduttori e non su tutto il loro volume. Talvolta questa proprietà fondamentale dei conduttori in equilibrio elettrostatico è attribuita a Michael Faraday (1791-1867). Questo esperimento dimostra che il fenomeno era già conosciuto da Gray[44].

La seconda scoperta, espressa nell'ultima frase citata sopra, è il fatto che un conduttore elettrizzato viene scaricato quando tocca un altro conduttore collegato a terra, cioè quando il conduttore elettrizzato è messo a terra. Gray sembra riferirsi qui ai suoi esperimenti del 1708. Si vedano le Sezioni 4.2 e 4.5.

## B.9 Scoperta del potere delle punte

Inizialmente Gray dispose la foglia di ottone su un supporto, che era una tavola rotonda di 30 cm di diametro, con la carta bianca incollata su di essa, sorretta su un piedistallo alto 30 centimetri. Nel seguito del suo articolo storico, Gray descrisse anche un'altra scoperta molto importante, ovvero[45]:

> In questi esperimenti, oltre al grande supporto sopra citato, io feci uso di due più piccoli, che siccome trovai molto utili potrebbe non essere improprio descrivere. Le loro sommità avevano un diametro di tre pollici [7,6 cm]; esse erano sorrette da una colonna di circa un piede [30 cm] in altezza, le loro basi di circa quattro pollici e mezzo [11,4 cm]. Essi erano costruiti con *Lignum vitae* [un tipo di legno], le loro sommità e le basi realizzate in modo da avvitarsi per comodità di trasporto. Sulle sommità era incollata carta bianca. Quando l'ottone in foglie è posto su uno qualsiasi di questi banchi, osservo che esso è attratto da un'altezza molto superiore di quando è posto su un tavolo, e almeno tre volte in più rispetto a quando è posto sul pavimento di una stanza.

Una rappresentazione di questo esperimento può essere trovata in Figura B.22.

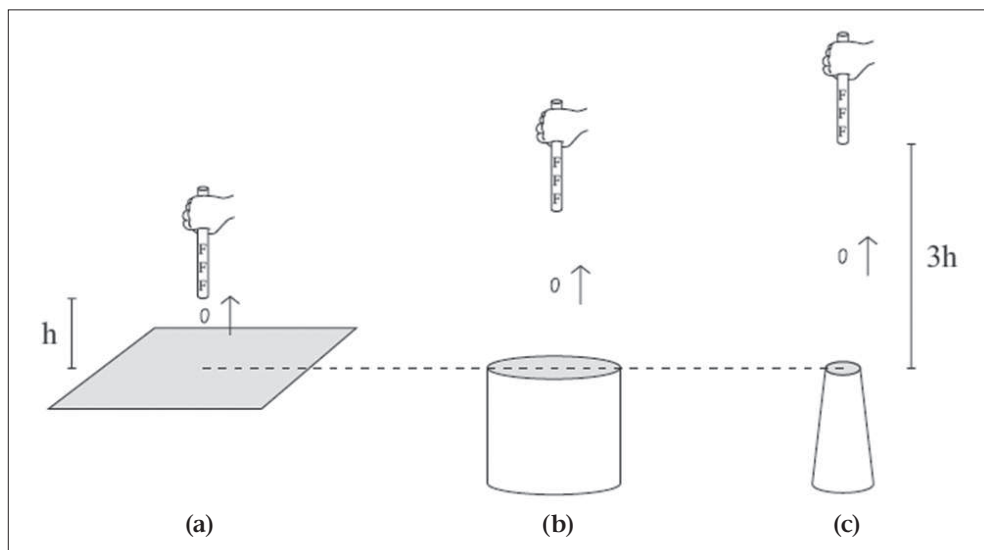



Figura B.22 **(a)** Una piccola foglia di ottone è attratta da un'altezza *h* dalla sua posizione iniziale al suolo. **(b)** Essa si solleva di più quando è posta su un tavolo o su un cilindro conduttore di 30 cm di diametro. **(c)** Quando è su un conduttore conico, è attratta tre volte di più rispetto a quando è sul pavimento.

Questa è una delle prime descrizioni note del potere delle punte. Cioè, la forza elettrica è più forte intorno a regioni acute e appuntite di conduttori che intorno a superfici piane.

Nella sezione 4.10 abbiamo analizzato il comportamento delle frecce attaccate ad un pendolo elettrico. Esse puntavano verso la cannuccia strofinata che le attraeva prima di entrare in contatto con essa. Dopo il contatto, esse puntavano lontano dalla cannuccia. Questo comportamento è correlato con il potere delle punte scoperto da Gray.

## B.10 Conclusione

Senza dubbio questo è uno degli articoli più importanti dell'intera storia dell'elettricità. Il numero di scoperte fondamentali fatte da un semplice tintore in pensione che non ha mai studiato all'università è veramente impressionante. A quel tempo aveva 63 anni. Consideriamo che il principale contributo di Gray sia la sua scoperta dei conduttori e isolanti. Egli descrisse alcune delle loro proprietà principali. Questo ha permesso un controllo dei fenomeni elettrici, aprendo la strada ad una serie di nuove scoperte che furono fatte poco dopo da Gray stesso e da altri scienziati. In altri suoi articoli Gray descrisse molte nuove scoperte estremamente importanti nel campo dell'elettricità, ma noi non ne discuteremo qui.

Du Fay seguì attentamente i lavori di Gray e fu fortemente influenzato dai suoi articoli. Le scoperte di Du Fay della repulsione elettrica, del meccanismo *ACR*, e dei due tipi di elettricità, furono fatte dopo che egli decise di riprodurre ed esplorare le molte scoperte che Gray aveva fatto in precedenza. Per esempio, in una delle sue più importanti opere, Du Fay disse quanto segue[46]:

> Supplico vostra Grazia di comunicarla [questa lettera] alla *Royal Society*, in particolare al sig. *Gray*, che lavora su questo argomento con tanta applicazione e successo, e col quale mi sento in debito per le scoperte che ho fatto, così come per quelle che potrò eventualmente fare in futuro, dal momento che è grazie ai suoi scritti che mi sono risolto ad applicarmi a questo tipo di esperimenti.

Abbiamo iniziato questo libro descrivendo l'effetto ambra, un esperimento noto almeno dal tempo di Platone, IV secolo a.C. Abbiamo concluso con una descrizione delle opere di un tintore in pensione le cui scoperte ci hanno permesso un grande avanzamento nella nostra comprensione della natura e nel campo tecnico dell'elettricità. I modi in cui la scienza si è sviluppata sono davvero affascinanti!

## Note

[1] [Grah].
[2] [Cm79], [Hei81c], [Hei99, pp. 242-249], [CC00] e [BC09].
[3] [Chi54], [Grab], [Grah], [Grad], [Graf], [Grag], [Grae], [Grai], [Grac] e [Graa].
[4] [Hei81c].
[5] [Chi54].
[6] [Chi54, p. 38, nota 6].
[7] [Grab].
[8] [Grah].
[9] [Grah, pp. 18-19].
[10] [Chi54, pp. 34 e 37].
[11] [Grah, p. 20].
[12] [Haub] e [Hei99, p. 245].
[13] [Grah, p. 20].
[14] [Grab].

[15] [Grah, pp. 19-20].
[16] [Grah].
[17] [Hei99, p. 246, nota].
[18] [Grah, p. 22].
[19] [Hei99, p. 246].
[20] [Grah, p. 25].
[21] [Grah, pp. 26-27].
[22] [Grah, p. 36].
[23] [Grad, p. 228] e [Grag, pp. 399 e 406].
[24] [Grae, pp. 18 e 20].
[25] [Fig67, Vol. 1, Figura 227, p. 441], [Fig85, p. 321], [Bor] e [FM91, p. 88].
[26] [Nol53].
[27] [Dop74].
[28] [Grah, pp. 28-29].
[29] [GS89], [BWb] e [Dop74].
[30] [Grah, pp. 33-34].
[31] Questi "hair-lines" potrebbero essere fili di crine o fili setosi, ma non è del tutto chiaro. [n.d.t.]
[32] [Grah, p. 39].
[33] [DF33d, pp. 250-251].
[34] [Grae, p. 17].
[35] [Dop74] e [Hei99, p. 249].
[36] [Grah, pp. 38-39].
[37] [Grah, pp. 39-41].
[38] [Dop74].
[39] [Nol53].
[40] [DF33d, pp. 248-249] e [RR57, p. 584].
[41] [DF33d, pp. 248-249].
[42] J'ai pris deux morceaux d'un cordon de fil, gros comme le doigt, dont le premier SA, avoit 6 pieds de long, & l'autre *CB*, en avoit 8, je les ai assujettis chacun par un bout à deux brides de soye *DE*, & *FG*, qui les coupoient à angles droits, & qui étoient disposées de sorte qu'approchant ou éloignant parallelement ces brides l'une de l'autre, les deux bouts des deux cordons s'éloignoient ou s'approchoient l'un de l'autre, de mani´ere qu'on pouvoit les fixer à la distance qu'on souhaitoit. Au bout B du cordon de 8 pieds étoit suspenduë une boule de bois, & le bout le plus éloigné du cordon de 6 pieds étoit fixé à une troisiéme bride de soye en S pour la soûtenir en l'air; présentant ensuite le tube frotté au bout S du cordon SA, après avoir éloigné les deux cordons d'un pouce l'un de l'autre, l'électricité étoit aussi sensible dans la boule que si le cordon eût été continu, à 3 pouces elle l'étoit encore beaucoup, à 6 pouces un peu moins, & à 1 pied beaucoup moins, & à peu-près comme à la distance de 1256 pieds de corde continuë; la matiére électrique coule donc librement dans l'air, sans être fixée par aucun corps. Cette expérience prouve combien il est nécessaire que la corde dont on se sert pour transmettre au loin l'électricité, soit isolée, ou ne soit soûtenuë que de corps les moins propres qu'il est possible à se charger eux-mêmes de l'électricité.
[43] [Grah, p. 35].
[44] [CM79, p. 396] e [Hei99, pp. 248-249].
[45] [Grah, p. 42].
[46] [DF, pp. 265-266] e [BC07, p. 643].

# Bibliografia

[Aep79] F. U. T. Aepinus. Aepinus's Essay on the Theory of Electricity and Magnetism. Princeton University Press, Princeton, 1979. Translation by P. J. Connor. Introductory monograph and notes by R. W. Home.

[AH07] A. K. T. Assis and J. A. Hernandes. The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents. Apeiron, Montreal, 2007. ISBN: 978-0-9732911-5-5.
Disponibile sul sito: http://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[AH09] A. K. T. Assis and J. A. Hernandes. A Força Elétrica de uma Corrente: Weber e as Cargas Superficiais de Condutores Resistivos com Correntes Constantes, volume 73 of Acadêmica. Edusp and Edufal, São Paulo and Maceió, 2009. ISBNs: 978-85-314-1123-6 and 978-85-7177-431-5.

[Amp22] A.-M. Ampère. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques. Annales de Chimie et de Physique, 20:60-74, 1822.

[Ari52a] Aristotle. Metaphysics, In: The Works of Aristotle, Vol. 1. In Great Books of the Western World, R. M. Hutchins, Editor in Chief, Vol. 8, pages 495-626, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Translated by W. D. Ross.

[Ari52b] Aristotle. Meteorology, In: The Works of Aristotle, Vol. 1. In Great Books of the Western World, R. M. Hutchins, Editor in Chief, Vol. 8, pages 443-494, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Translated by E. W. Webster.

[Ari52c] Aristotle. On the Soul, In: The Works of Aristotle, Vol. 1. In Great Books of the Western World, R. M. Hutchins, Editor in Chief, Vol. 8, pages 627-668, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Translated by J. A. Smith.

[Ass08] A. K. T. Assis. Arquimedes, o Centro de Gravidade e a Lei da Alavanca. Apeiron, Montreal, 2008. ISBN: 978-0-9732911-7-9.
Disponibile sul sito: http://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass10a] A. K. T. Assis. The Experimental and Historical Foundations of Electricity. Apeiron, Montreal, 2010.
Disponibile sul sito: http://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass10b] A. K. T. Assis. Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade. Apeiron, Montreal, 2010.
Disponibile sul sito: http://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass10c] A. K. T. Assis. Archimedes, the Center of Gravity, and the First Law of Mechanics: The Law of the Lever. Apeiron, Montreal, 2nd edition, 2010. ISBN: 978-0-986492648.
Disponibile sul sito: http://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass15] A. K. T. Assis. The Experimental and Historical Foundations of Electricity. Apeiron, Montreal, 2015. Book in Russian translated from the English version by A. Baraov.
Disponibile sul sito: http://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[BC07] S. L. B. Boss and J. J. Caluzi. Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa segundo Du Fay. Revista Brasileira de Ensino de Física, 29:635-644, 2007.

[BC09] S. L. B. Boss and J. J. Caluzi. Uma breve biografia de Stephen Gray (1666-1736). Revista Brasileira de Ensino de Física, 32:1602-1609, 2009.

[Ben86] A. Bennet. Description of a new electrometer. Philosophical Transactions, 76:26-34, 1786.

[Ben98] P. Benjamin. A History of Electricity (The Intellectual Rise in Electricity) from Antiquity to the Days of Benjamin Franklin. Wiley, New York, 1898.

[Blo82] C. Blondel. A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820-1827). Bibliothèque Nationale, Paris, 1982.

[Bor] G. Borvon. Pourquoi deux espèces d'électricité? Pourquoi deux sens du courant électrique? L'histoire de l'électricité nous aide à comprendre.
Disponibile sul sito: www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique.

[Boy00] R. Boyle. Experiments and notes about the mechanical origine or production of electricity. In M. Hunter and E. B. Davis, editors, The Works of Robert Boyle, Vol. 8, pages 509-523. Pickering & Chatto, London, 2000. Work originally published in 1675.

[BWa] C. Blondel and B. Wolff. Que dit l'article ELECTRICITE de l'Encyclopédie?
Disponibile sul sito: www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique.

[BWb] C. Blondel and B.Wolff. Teinturiers et tubes de verre: Gray et Dufay.
Disponibile sul sito: www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique.

[BWc] C. Blondel and B. Wolff. Un tournant dans l'histoire de l'électricité: la mathématisation.
Disponibile sul sito: www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique.

[CA08] J. Camillo and A. K. T. Assis. Construção de um gerador eletrostático gotejante: chuva elétrica de Kelvin. A Física na Escola, 9:29-32, 2008.

[Can53] J. Canton. Electrical experiments, with an attempt to account for their several phaenomena; together with observations on thunderclouds. Philosophical Transactions, 48:350-358, 1753.

[Can54] J. Canton. A letter to the Right Honourable the Earl of Macclesfield, President of the Royal Society, concerning some new electrical experiments. Philosophical Transactions, 54:780-785, 1754.

[CC00] D. H. Clark and S. P. H. Clark. Newton's Tyranny: The Suppressed Scientific Discoveries of Stephen Gray and John Flamsteed. Freeman, New York, 2000.

[Cer14] P. Cerreta, 2014. Esperimenti di elettrostatica.
Disponibile sul sito: http://www.scienzaviva.it/Esperimenti_elettrostatica_2014.php.

[Cha09] J. P. M. d. C. Chaib. Análise do Significado e da Evolução do Conceito de Força de Ampère, juntamente com a Tradução Comentada de sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas– UNICAMP, Campinas, Brazil, 2009. Supervisor: A. K. T. Assis.
Disponibile sul sito: http://repositorio.unicamp.br/ e http://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Chi54] R. A. Chipman. An unpublished letter of Stephen Gray on electrical experiments, 1707-1708. Isis, 45:33-40, 1954.

[CM79] D. H. Clark and L. Murdin. The enigma of Stephen Gray astronomer and scientist (1666-1736). Vistas in Astronomy, 23:351-404, 1979.

[Desa] J. T. Desaguliers. Experiments made before the Royal Society, Feb. 2. 1737-8. Philosophical Transactions, 41:193-199, 1739-1741.

[Desb] J. T. Desaguliers. Several electrical experiments, made at various times, before the Royal Society. Philosophical Transactions, 41:661-667, 1739-1741.

[Desc] J. T. Desaguliers. Some thoughts and experiments concerning electricity. Philosophical Transactions, 41:186-193, 1739-1741.

[DF] C. F. d. C. Du Fay. A letter from Mons. Du Fay, F. R. S. and of the Royal Academy of Sciences at Paris, to His Grace Charles Duke of Richmond and Lenox, concerning electricity. Translated from the French by T. S. M D. Philosophical Transactions, 38:258-266, 1733-4.

[DF33a] C. F. d. C. Du Fay. Premier mémoire sur l'électricité. Histoire de l'électricité. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, pages 23-35, 1733.

[DF33b] C. F. d. C. Du Fay. Quatriéme mémoire sur l'électricité. De l'attraction et répulsion des corps électriques. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, pages 457-476, 1733.

[DF33c] C. F. d. C. Du Fay. Second mémoire sur l'électricité. Quels sont les corps qui sont susceptibles d'électricité. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, pages 73-84, 1733.

[DF33d] C. F. d. C. Du Fay. Troisiéme mémoire sur l'électricité. Des corps qui sont le plus vivement attirés par les matiéres électriques, et de ceux qui sont les plus propres à transmettre l'électricité. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, pages 233-254, 1733.

[DF34a] C. F. d. C. Du Fay. Cinquiéme mémoire sur l'électricité. Oú l'on rend compte des nouvelles découvertes sur cette matiére, faites depuis peu par M. Gray; et où l'on examine quelles sont les circonstances qui peuvent apporter quelque changement à l'électricité pour l'augmentation ou la diminution de la force, comme la tempèrature de l'air, le vuide, l'air comprimé, etc. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, pages 341-361, 1734.

[DF34b] C. F. d. C. Du Fay. Sixiéme mémoire sur l'électricité. Oú l'on examine quel rapport il y a entre l'électricité, et la faculté de rendre de la lumiére, qui est commune à la plûpart des corps électriques, et ce qu'on peut inférer de ce rapport. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, pages 503-526, 1734.

[DF37a] C. F. d. C. Du Fay. Huitiéme mémoire sur l'électricité. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, pages 307-325, 1737.

[DF37b] C. F. d. C. Du Fay. Septiéme mémoire sur l'électricité. Contenant quelques additions aux mémoires précédents. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, pages 86-100, 1737.

[Dop74] J. G. Doppelmayr. Neu-entdeckte Phaenomena von bewunderswürdigen Würkungen der Natur. Nurenburg, 1774.

[Fera] N. Ferreira. Mecânica. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE – Rede de Instrumentação para o Ensino.

[Ferb] N. Ferreira. Eletrostática, Vol. 1. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE – Rede de Instrumentação para o Ensino.

[Ferc] N. Ferreira. Eletrostática, Vol. 2. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE – Rede de Instrumentação para o Ensino.

[Ferd] N. C. Ferreira. Construa sua própria bússola!
Disponibile sul sito: http://chc.cienciahoje.uol.com.br/construa-sua-propria-bussola/.

[Fer78] N. C. Ferreira. Proposta de Laboratório para a Escola Brasileira – Um Ensaio sobre a Instrumentalização no Ensino Médio de Física. Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.

[Fer01a] N. C. Ferreira. Acende aqui, apaga ali. Ciência Hoje na Escola, 12:65-67, 2001.

[Fer01b] N. C. Ferreira. Faça como Gilbert: construa uma bússola de declinação. Ciência Hoje na Escola, 12:21-22, 2001.

[Fer01c] N. C. Ferreira. Magnetismo e eletricidade. Ciência Hoje na Escola, 12:14-17, 2001.

[Fer01d] N. C. Ferreira. O versorium. Ciência Hoje na Escola, 12:18-20, 2001.

[Fer06] N. Ferreira. Equilíbrio. Projeto RIPE, Instituto de Física, USP, São Paulo, 2006. Disponibile sul sito: www.cienciamao.usp.br/tudo/indice.php?midia=rip.

[Fig67] L. Figuier. Ler Merveilles de la Science ou Description Populaire des Inventions Modernes, volume 1. Jouvet et Cie., Paris, 1867.

[Fig85] L. G. Figuier. Les Merveilles de l'Électricité. Association pour l'Histoire de l'Électricité en France, Paris, 1985. Textes choisis présentés par Fabienne Cardot.

[FM91] N. Ferreira and J.-P. Maury. Plus et Moins, les Charges Électriques. Qu'est-ce que c'est? Ophrys, Paris, 1991.

[Fra55] G. Fracastoro. De sympathia & antipathia rerum. In: Opera omnia in unum proxime post ilius mortem collecta. Apud luntas, Venice, 1555.

[Gas91] A. Gaspar. Motor de ímã móvel. Caderno Catarinense de Ensino de Física, 8:188-193, 1991.

[Gas96] A. Gaspar. História da Eletricidade. Ática, São Paulo, 1996.

[Gas03] A. Gaspar. Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental. Ática, São Paulo, 2003.

[GG90] I. Grattan-Guinness. Convolutions in French Mathematics, 1800-1840, volume 2. Birkhäuser, Basel, 1990.

[GG91] I. Grattan-Guinness. Lines of mathematical thought in the electrodynamics of Ampère. Physis, 28:115-129, 1991.

[Gil00] W. Gilbert. De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure; physiologia nova. London, 1600.

[Gil00] W. Gilbert. On the Magnet, Magnetick Bodies also, and on the Great Magnet the Earth; a New Physiology, Demonstrated by Many Arguments & Experiments. Chiswick Press, London, 1900. Translated by S. P. Thompson.

[Gil78] W. Gilbert. On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth, volume 28, pp. 1-121 of Great Books of the Western World. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1978. Translated by P. F. Mottelay.

[Gli33] M. Gliozzi. L'elettrologia nel secolo XVII. Periodico di Matematiche, 13:1-14, 1933.

[Graa] S. Gray. An account of some electrical experiments intended to be communicated to the Royal Society by Mr. Stephen Gray, F. R. S. taken from his mouth by Cromwell Mortimer, M. D. R. S. Secr. On Feb. 14, 1735-6. Being the day before he died. Philosophical Transactions, 39:400-403, 1735-1736.

[Grab] S. Gray. An account of some new electrical experiments. Philosophical Transactions, 31:104-107, 1720-1.

[Grac] S. Gray. Concerning the revolutions which small pendulous bodies will, by electricity, make round larger ones from West to East as the planets do round the Sun. Philosophical Transactions, 39:220, 1735-1736.

[Grad] S. Gray. The electricity of water. Philosophical Transactions, 37:227-230 (addenda in page 260), 1731-2.

[Grae] S. Gray. Experiments and observations upon the light that is produced by communicating electrical attraction to animate or inanimate bodies, together with some of its most surprising effects. Philosophical Transactions, 39:16-24, 1735-6.

[Graf] S. Gray. Farther account of his experiments concerning electricity. Philosophical Transactions, 37:285-291, 1731-2.

[Grag] S. Gray. Farther accounts of his experiments concerning electricity. Philosophical Transactions, 37:397-407, 1731-2.

[Grah] S. Gray. Several experiments concerning electricity. Philosophical Transactions, 37:18-44, 1731-2.

[Grai] S. Gray. Some experiments relating to electricity. Philosophical Transactions, 39:166-170, 1735-6.

[GS89] G. Gaudenzi and R. Satolli. Jean-Paul Marat: Scienziato e Rivoluzionario. Mursia, Milano, 1989.

[Gue94] O. v. Guericke. The New (So-Called) Magdeburg Experiments of Otto von Guericke, volume 137 of Archives Internationales d'Histoire des Idées. Kluwer, Dordrecht, 1994. Translation and preface by M. G. F. Ames.

[Gui05] A. P. Guimarães. From Lodestone to Supermagnets. Wiley, Berlin, 2005.

[Haua] F. Hauksbee. An account of an experiment made before the Royal Society at Gresham-College, touching the extraordinary elistricity of glass, produceable on a smart attrition of it; with a continuation of experiments on the same subject, and other phenomena. Philosophical Transactions, 25:2327-2335, 1706-1707.

[Haub] F. Hauksbee. An account of the repetition of an experiment touching motion given bodies included in a glass, by the approach of a finger near its outside: With other experiments on the effluvia of glass. Philosophical Transactions, 26:82-86, 1708-1709.

[Hau09] F. Hauksbee. Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects, containing an Account of Several Surprising Phenomena touching Light and Electricity, producible on the Attrition of Bodies. With many other Remarkable Appearances, not before observ'd. R. Brugis, London, 1709.

[Hea67] N. H. d. V. Heathcote. The early meaning of electricity: Some Pseudodoxia Epidemica – I. Annals of Science, 23:261-275, 1967.

[Hei79] J. L. Heilbron. Electricity in the 17th & 18th Centuries. University of California Press, Berkeley, 1979.

[Hei81a] J. L. Heilbron. Aepinus, Franz Ulrich Theodosius. In C. C. Gillispie, editor, Dictionary of Scientific Biography, Vol. 1, pages 66-68. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.

[Hei81b] J. L. Heilbron. Dufay (Du Fay), Charles-François de Cisternay. In C. C. Gillispie, editor, Dictionary of Scientific Biography, Vol. 4, pages 214-217. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.

[Hei81c] J. L. Heilbron. Gray, Stephen. In C. C. Gillispie, editor, Dictionary of Scientific Biography, Vol. 5, pages 515-517. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.

[Hei81d] J. L. Heilbron. Hauksbee, Francis. In C. C. Gillispie, editor, Dictionary of Scientific Biography, Vol. 6, pages 169-175. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.

[Hei81e] J. L. Heilbron. Nollet, Jean-Antoine. In C. C. Gillispie, editor, Dictionary of Scientific Biography, Vol. 10, pages 145-148. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.

[Hei82] J. L. Heilbron. Elements of Early Modern Physics. University of California Press, Berkeley, 1982.

[Hei99] J. L. Heilbron. Electricity in the 17th and 18th Centuries – A Study in Early Modern Physics. Dover, New York, 1999.

[Hem80] l'abbé Hemmer. Sur l'électricité des métaux. Journal de Physique, 16:50-52, 1780.

[Hom67] R. W. Home. Francis Hauksbee's theory of electricity. Archive for the History of Exact Sciences, 4:203-217, 1967. Reprinted in R. W. Home, Electricity and Experimental Physics in 18th-Century Europe (Variorum, Hampshire, 1992), Chapter III.

[Hom81] R. W. Home. The Effluvial Theory of Electricity. Arno Press, New York, 1981.

[Jac99] J. D. Jackson. Classical Electrodynamics. John Wiley & Sons, New York, third edition, 1999.

[Kel81] S. Kelly. Gilbert, William. In C. C. Gillispie, editor, Dictionary of Scientific Biography, Vol. 5, pages 396-401. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.

[Kra81] F. Krafft. Guericke, (Gericke), Otto von. In C. C. Gillispie, editor, Dictionary of Scientific Biography, Vol. 5, pages 574-576. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.

[Lae91] D. Laertius. Lives of Eminent Philosophers, volume 1. Harvard University Press, Cambridge, 1991. Translated by R. D. Hicks.

[Llo80] J. T. Lloyd. Lord Kelvin demonstrated. The Physics Teacher, 18:16-24, 1980.

[Max81] J. C. Maxwell. An Elementary Treatise on Electricity. Clarendon Press, Oxford, 1881.

[Med02] A. Medeiros. As origens históricas do eletroscópio. Revista Brasileira de Ensino de Física, 24:353-361, 2002.

[Mel98] M. A. Melehy. Thermal momentum in thermodynamics, part 2. Interfacial electrification: a new consequence of the first and second laws. Physics Essays, 11:430-433, 1998.

[Net] L. F. Netto. Feira de ciências.
Disponibile sul sito: www.feiradeciencias.com.br.

[New52a] I. Newton. Mathematical Principles of Natural Philosophy, volume 34, pp. 1-372 of Great Books of the Western World. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952. Translated by A. Motte and revised by F. Cajori.

[New52b] I. Newton. Optics, volume 34, pp. 377-544 of Great Books of the Western World. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952.

[Nol47] l'Abbé Nollet. Éclaircissemens sur plusieurs faits concernant l'électricité. Mémoires de l'Académie royale des Sciences, pages 102-131, 1747.

[Nol53] J. A. Nollet. Essai sur l'Électricité des Corps. Freres Guerin, Paris, 3rd edition, 1753.

[Nol67] J. A. Nollet. Lettres sur l'électricité, dans lesquelles on trouvera les principaux phénomènes qui ont été découverts depuis 1760, avec des discussions sur les conséquences qu'on en peut tirer. Durand, Neveu, Libraire, Paris, 1767. Troisieme partie.

[Ors98a] H. C. Orsted. New electro-magnetic experiments. In K. Jelved, A. D. Jackson, and O. Knudsen, editors, Selected Scientific Works of Hans Christian Orsted, pages 421-424. Princeton University Press, Princeton, 1998. Paper originally published in German in 1820.

[Ors98b] H. C. Orsted. Observations on electro-magnetism. In K. Jelved, A. D. Jackson, and O. Knudsen, editors, Selected Scientific Works of Hans Christian Orsted, pages 430-445. Princ-

eton University Press, Princeton, 1998. Reprinted from Thomson's Annals of Philosophy, Vol. 2, pp. 321-337 (1821).

[Pla52a] Plato. Protagoras. In Great Books of the Western World, R. M. Hutchins, Editor in Chief, Vol. 7, pages 38-64, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Translated by B. Jowett.

[Pla52b] Plato. Timaeus. In Great Books of the Western World, R. M. Hutchins, Editor in Chief, Vol. 7, pages 442-477, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Translated by B. Jowett.

[Pri72] J. Priestley. An account of a new electrometer, contrived by Mr. William Henly, and of several electrical experiments made by him, in a letter from Dr. Priestley, F.R.S. to Dr. Franklin, F.R.S. Philosophical Transactions, 62:359-364, 1772.

[Pri66] J. Priestley. The History and Present State of Electricity, volume 1. Johnson Reprint Corporation, New York, 1966. The Sources of Science, Number 18. Reprinted from the third edition, London, 1755.

[Que] A. C. M. d. Queiroz. Electrostatic machines.
Disponibile sul sito: http://www.coe.ufrj.br/~acmq/.

[RR53] D. Roller and D. H. D. Roller. The prenatal history of electrical science. American Journal of Physics, 21:343-356, 1953.

[RR57] D. Roller and D. H. D. Roller. The Development of the Concept of Electric Charge. In J. B. Conant, editor, Harvard Case Studies in Experimental Science, chapter 8, pages 541-639. Harvard University Press, Cambridge, 1957.

[Sas02] W. M. Saslow. Electricity, Magnetism, and Light. Academic Press, New York, 2002.

[The56] Theophrastus. Theophrastus on Stones. The Ohio State University, Columbus, 1956. Introduction, Greek text, English translation, and commentary by E. R. Caley and J. F. C. Richards.

[Tho] W. Thomson. On a self-acting apparatus for multiplying and maintaining electric charges, with applications to illustrate the voltaic theory. Proceedings of the Royal Society of London, 16:67-72, 1867-1868.

[Wal36] W. C. Walker. The detection and estimation of electric charges in the eighteenth century. Annals of Science, 1:66-100, 1936.

[Wil59] B. Wilson. Experiments on the tourmalin. Philosophical Transactions, 51:308-339, 1759.

[Zan81] B. Zanobio. Fracastoro, Girolamo. In C. C. Gillispie, editor, Dictionary of Scientific Biography, Vol. 5, pages 104-107. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.

**ASSOCIAZIONE PER L'INSEGNAMENTO DELLA FISICA**

**Art. 1** - L'Associazione per l'Insegnamento della Fisica (A.I.F.) è una associazione senza fini di lucro, che ha lo scopo di migliorare e rivalutare l'insegnamento della fisica e di contribuire ad elevare il livello della cultura scientifica in Italia. A tal fine stampa e diffonde pubblicazioni a carattere didattico e culturale, organizza attività di aggiornamento e di formazione insegnanti, convegni e congressi ed effettua tutte le iniziative atte a conseguire lo scopo suddetto.

**Sede:** Liceo Classico "G. D. Romagnosi", viale Maria Luigia, 1 - 43125 Parma; Tel. 377 1671597 - Fax 02 39195491 - aif@aif.it



Sezioni e Segretari:

ALCAMO - **Giuseppa Reina** - Via Novelli, 57 - 91011 Alcamo (TP) - Tel. 092 4507310
ALESSANDRIA - **Mara Morando** - Via XX Settembre, 48 - 15100 Alessandria - Tel. 0131 254037
AOSTA - **Silvana Arietti** - Fraz. Arpuilles, 41 - 11100 Aosta - Tel. 338 3193410
BARI - **Kay Gadaleta** - Parallela 1 Sud Viale Monsignor A. Bello, 3 - 70056 Molfetta (BA)
BERGAMO - **Sergio Pizzigalli** - Via Muraine, 2 - 24124 Bergamo - Tel. 035 241962
BOLOGNA - **Barbara Poli** - Via Pioppe Berleta, 45 - 40043 Marzabotto (BO) - Tel. 333 9886964
BRESCIA - **Flavio Ciprani** - Via Fratelli Bonardi,14 - 25126 Brescia - Tel. 030 312053
BRINDISI - **Domenico Di Rocco** - Istituto Tecnico Tecnologico "G. Giorgi" - via Amalfi, 6 - 72011 Brindisi Casale - Tel. 0831 418894
CAGLIARI - **Ugo Galassi** - Via Fleming, 8 - 09126 Cagliari - Tel. 070 306841
CALTANISSETTA - **Maria Concetta Petitto** - Via Poggio Sant'Elia, 50 - 93100 Caltanisetta (CL) - Tel. 3285390793
CASTELVETRANO - **Giovanni Teri** - Via B. Molinari La Grutta, 33 - 91028 Partanna (TP) - Tel. 0924 921841
CATANIA - **Andrea Saija** - Via Filocomo, 30 - 95125 Catania - Tel. 095 441959
CATANZARO - **Isidoro Cesarò** - Via Madonna dei Cieli, 21 - 88100 Catanzaro - Tel. 0961 747399
COSENZA - **Francesco Plastina** - c/o Dip. di Fisica Università della Calabria - Via Bucci, 31C - 87036 Arcavacata di Rende (CS) - francesco.plastina@fis.unical.it
FERRARA - **Fabiano Minni** - Via Eligio Mari, 31 - 44100 Ferrara - Tel. 0532 60445
GIARRE - RIPOSTO - **Antonino Pennisi** - Via Pio La Torre, 19 - 95018 Riposto (CT) - Tel. 095 7794143
L'AQUILA - **Lino De Santis** - Viale A. De Gasperi, 45 - 67100 L'Aquila - Tel. 0862 411716
LATINA - **Raffaele Pisano** - Université Charles de Gaulle-Lille 3, Théodile-CIREL EA 4354, France -Tel. 39 3393164592
LIGURIA - **Daniele Grosso** - c/o Dip. di Fisica dell'Università di Genova - Via Dodecaneso, 33 - 16146 Genova
LUGO - **Franco Fasano** - Via della Repubblica, 26 - 48010 Fusignano (RA) - Tel. 0545 51069
MANTOVA - **Daniela Caraffini** - Via Bologne, 6 - 46010 Redondesco (MN) - Tel. 0376 954365
MASSAFRA - Sezione in corso di riorganizzazione
MESSINA - **Giovanni Magliarditi** - Via S. Marta n. 278 - 98123 Messina - Tel. 090 672900
MILANO - **Giacomo Di Iorio** - Via Cardinal Ferrari, 27 - 20099 Sesto S. Giovanni (MI) - Tel. 333 5446576
MODENA - **Gabriele Tassinari** - Via Domenico Modugno, 82/1 - 44042 Cento (FE) - Tel. 329 1086666
MONDOVÌ - **Gemma Ghigo** - Via G.B. Bongioanni, 27 - 12100 Cuneo - Tel. 0171 791140
NAPOLI 1 - **Laura Franchini** - Via Nevio, 102/F - 80122 Napoli - Tel. 081 5752688
NAPOLI 2 - **Vincenzo Cioci** - Corso Chiaiano, 50 - 80145 Napoli - Tel. 328 0142719
PADOVA - **Giuliana Salvagno** - via Vergerio, 31 - 35126 Padova - Tel. 049 750330
PARMA - **Antonio Gandolfi** - Via Bixio, 67 - 43100 Parma
PAVIA - **Vittoria Cinquini** - Via Ferrini, 2b - 27100 Pavia - Tel. 0382 471450
PERUGIA - **Rita Serafini** - Via Campo di Marte, 4M-1 - 06124 Perugia - Tel. 075 5057967
PESCARA - **Antonio di Pomponio** - Via Caduta del Forte, 60 - 65121 Pescara - Tel. 085 4216524
PIACENZA - **Carlo Colombini** - Viale S. Ambrogio, 43 - 29100 Piacenza - Tel. 333 6457044
PISA - **Sabina Sarti** - Via Piero di Puccio, 1 - 56124 Pisa
PORDENONE - **Isidoro Sciarratta** - Via Domenico Casella, 12 - 33080 S. Quirino (PN) - Tel. 0434 918828
ROMA - **Luigi Ronci** - Via Val Senio 6, - 00184 Roma - Tel. 06 88701011
ROMA OSTIENSE - **Marco Litterio** - Via dei Promontori, 219 - 00122 Roma - Tel. 06 56386326
SALENTO - **Salvatore Viva** - Via S. Pellico - 73040 Torrepaduli (LE) - Tel. 0833 691444
SALERNO - **Adele De Santis** - Via R. Giordano, 8 - 84100 Salerno - Tel. 089 227829
SASSARI - **Rita Pistidda** - Via F. Addis, 2 - 07100 Sassari - Tel. 079 292791
SENIGALLIA - **Mario Capotondi** - Via Vittorio Veneto, 81 - 60010 Barbara (AN)
SETTIMO TORINESE - **Tommaso Marino** - Via Cefalonia, 6 - 10096 Collegno (TO) - Tel. 347 5138535
SIENA - **Vera Montalbano** - Via Roma, 56 - 53100 Siena - Tel. 0575 234675
SIRACUSA - **Claudia Caligiore** - Via Sandro Pertini, 21 - 95014 Giarre (CT) - Tel. 340 9379492
TERAMO APRUTIUM - **Giovanni Bindi** - Via delle Camelie, 25 - 64025 Pineto (TE) - Tel. 0859 490923
TORINO - **Ennio Iannucci** - Piazza D. Chiaves, 8/4 - 10153 Torino - Tel. 011 8993389
TRENTO - **Alberto Meroni** - Via Brennero, 68 - 38100 Trento - Tel. 0461 829934
TREVISO - **Chiara Magoga** - Via Postumia Est, 113 - 31042 Fagaré (TV) - Tel. 0422 890269
UDINE - **Lorenzo Marcolini** (Segretario *pro tempore*) - Via Cividale, 1 - 33050 Gonars (UD) - Tel. 0432 923219
VENEZIA - **Giuliana Cavaggioni Righi** - Via Canove, 45 - 30037 Scorzé (VE) - Tel. 041 5840462

LA FISICA NELLA SCUOLA

*QUADERNO N. 26*

# I fondamenti sperimentali e storici dell'elettricità

## Andre Koch Torres Assis

BOLLETTINO TRIMESTRALE DELL'ASSOCIAZIONE PER L'INSEGNAMENTO DELLA FISICA

ANNO L - N. 2 SUPPLEMENTO APRILE-GIUGNO 2017

***I fondamenti sperimentali e storici dell'elettricità*** affronta aspetti basilari della fisica. Il libro descrive gli esperimenti e le scoperte principali della storia dell'elettricità, a cominciare dall'effetto ambra, che è analogo al comune esperimento di attirare piccoli pezzi di carta con una cannuccia di plastica strofinata nei capelli. Spiega inoltre come costruire diversi strumenti: il versorium, i pendoli elettrici, gli elettroscopi e i collettori di carica. Vi sono discussi l'attrazione e la repulsione elettrica, le cariche positive e le negative, il meccanismo ACR (attrazione, comunicazione di elettricità e repulsione). Vengono analizzati i concetti di conduttore e di isolante, assieme alle principali differenze di comportamento dei materiali di cui essi sono costituiti. Tutti gli esperimenti sono descritti con chiarezza e vengono eseguiti con cose semplici e poco costose. I concetti, le definizioni e le leggi che riguardano i fenomeni considerati vengono ampiamente illustrati. L'esposizione degli aspetti storici è arricchita da importanti citazioni dei principali scienziati che ne furono protagonisti. Il libro presenta un'analisi esaustiva del lavoro di Stephen Gray (1666-1736), il grande scienziato britannico che scoprì conduttori e isolanti, e alcune delle loro principali caratteristiche. Completa il lavoro un'ampia bibliografia.

## SULL'AUTORE

Andre Koch Torres Assis è nato in Brasile (1962) e ha studiato presso l'Università di Campinas – UNICAMP (Bachelor of Science nel 1983 e PhD nel 1987). Ha trascorso l'anno accademico 1988 in Inghilterra, con una posizione di post-dottorato presso il Culham Laboratory (United Kingdom Atomic Energy Authority). Ha trascorso un anno (dal 1991 al '92) come Visiting Scholar presso il Center for Electromagnetics Research della Northeastern University (Boston, USA). Dall'agosto 2001 al novembre 2002 e da febbraio a maggio 2009, ha lavorato presso l'Istitute for the History of Natural Sciences alla Hamburg University (Amburgo, Germania), con borse di ricerca assegnate dalla Alexander von Humboldt Foundation of Germany. Dall'aprile al giugno 2014, ha lavorato presso la Technische Universität Dresden (Dresda, Germania), con borse di ricerca assegnate dalla Alexander von Humboldt Foundation of Germany. Egli è autore di Weber's Electrodynamics (1994); Relational Mechanics (1999); Inductance and Force Calculations in Electrical Circuits (con M. A. Bueno, 2001); The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents (con J. A. Hernandes, 2007); Archimedes, the Center of Gravity, and the First Law of Mechanics: The Law of the Lever (2008 e 2010); The Experimental and Historical Foundations of Electricity (2010); Weber's Planetary Model of the Atom (con K. H. Wiederkehr e G. Wolfschmidt, 2011); Stephen Gray and the Discovery of Conductors and Insulators (con S. L. Boss e J. J. Caluzi, 2012); The Illustrated Method of Archimedes: Utilizing the Law of the Lever to Calculate Areas, Volumes and Centers of Gravity (con C. P. Magnaghi, 2012); Relational Mechanics and Implementation of Mach's Principle with Weber's Gravitational Force (2014). Ampère's Electrodynamics – Analysis of the Meaning and Evolution of Ampère's Force between Current Elements, together with a Complete Translation of His Masterpiece: Theory of Electrodynamic Phenomena, Uniquely Deduced from Experience (con J. P. M. C. Chaib, 2015). È professore di fisica presso UNICAMP dal 1989 e lavora sui principi fondativi di elettromagnetismo, gravitazione, e cosmologia. Homepage: http://www.ifi.unicamp.br/~assis.

Direttore responsabile: RICCARDO URIGU - Direzione e redazione: Dipartimento di Fisica dell'Università - 41100 Modena
Periodico trimestrale registrato dal Tribunale di Modena con atto n. 540 del 29-1-1973
Stampa: Monotipia Cremonese s.n.c. - Via Costone di Mezzo, 19 - 26100 Cremona
Tariffa Associazioni Senza Fini di Lucro: "Poste Italiane s.p.a. - Spedizione in Abbonamento Postale -
D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 nº 46) art. 1, comma 2, DCB (Cremona)"